Biblioteca de Divulgación
SERIE CIENTÍFICA*

Dos físicos teóricos en activo no siempre tienen la generosidad (¡ni el tiempo!) de escribir física moderna, a la vez rigurosa y accesible, para cualquier ciudadano, razón por la cual hay que celebrar la publicación de este libro, una obra sin duda llamada a crear afición a la física: a hacerla, a comprenderla, a nutrirse de sus ideas y proyectarla en otras actividades creativas. Uno de los rasgos esenciales de toda ciencia en general, pero muy particularmente de la física fundamental, es la enorme dificultad que el pensador encuentra para intuir la realidad. Pero ahí reside también la grandeza de la física moderna: capacidad para comprender aún cuando casi nada de la realidad se puede intuir. Estas páginas acompañan a los lectores en un viaje apasionante, un trayecto por las cumbres y profundidades de la física actual, de la mano de dos científicos con las ideas y las palabras claras.

*Os temas candentes da ciencia actual tratados por especialistas da USC de xeito ameno e accesible

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

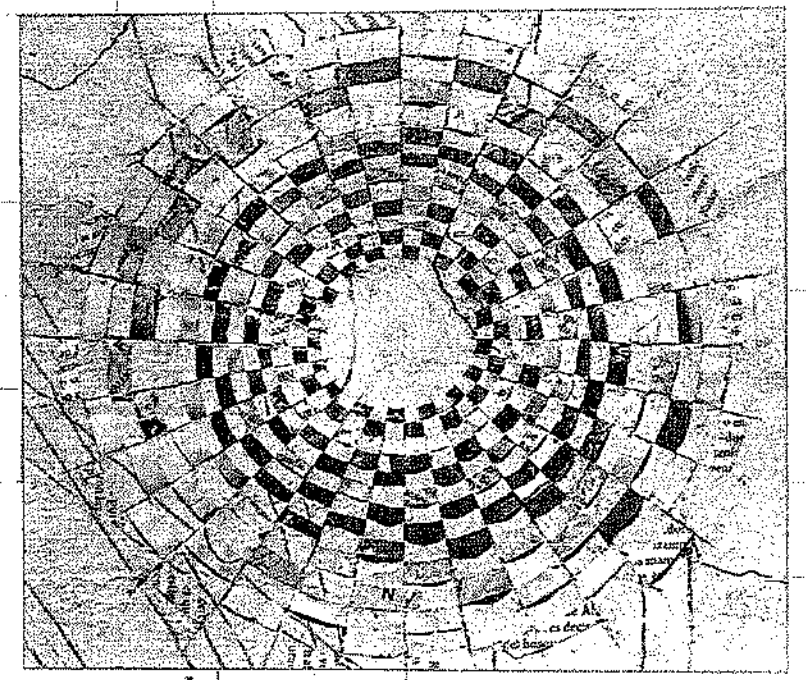
ISBN 978-84-16183-18-0

Antimateria, magia y poesía

Biblioteca de Divulgación
SERIE CIENTÍFICA

José Edelstein
Andrés Gomberoff

Antimateria, magia y poesía



UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

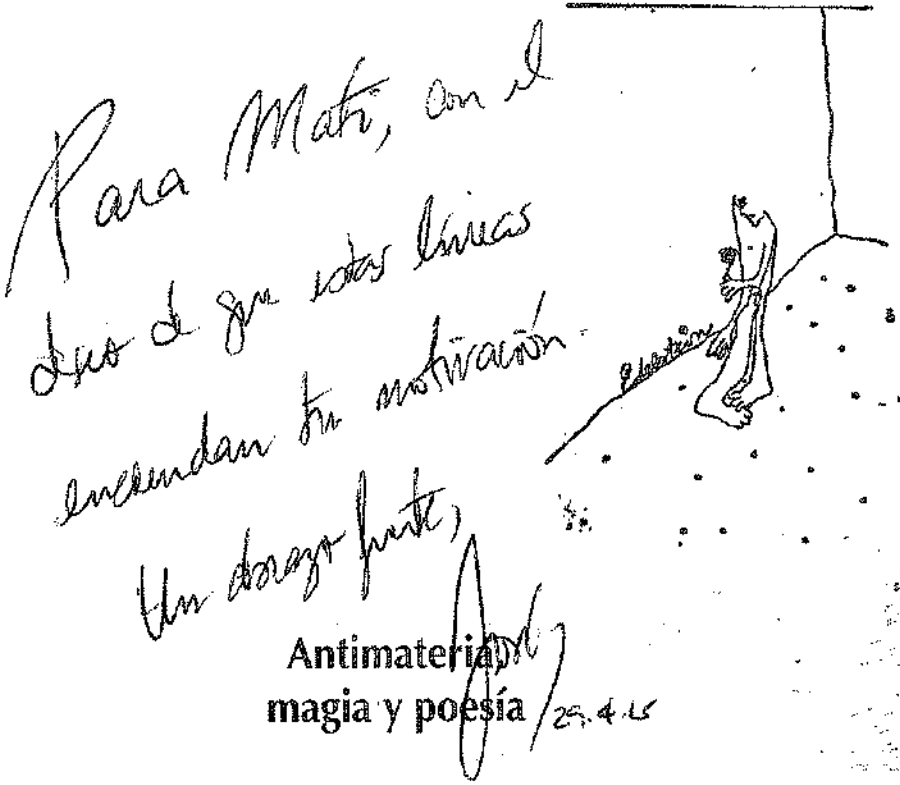
Foto: Silvia Vaulà

José Edelstein
(Buenos Aires, 1968)
Físico, licenciado en el Instituto Balseiro y doctorado en la Universidad Nacional de La Plata. Realizó investigaciones postdoctorales en la Universidad de Santiago de Compostela, en la que actualmente es profesor titular de Física Teórica, Harvard y el Instituto Superior Técnico de Lisboa. También es investigador asociado del CECs en Chile. Ha publicado más de medio centenar de artículos científicos en el campo de la física teórica de altas energías e impartido conferencias en una veintena de países. Sus textos de divulgación científica han aparecido en periódicos y revistas de Argentina, Brasil, Chile, España e Italia.

Foto: Fernando Senior

Andrés Gomberoff
(Santiago de Chile, 1969)
Doctor en física de la Universidad de Chile. Realizó investigaciones postdoctorales en el CECs (Valdivia) y en la Syracuse University (New York). Posteriormente trabajó como investigador en el CECs, la Universidad Católica y la Universidad Andrés Bello, en donde además fue vicerrector de Investigación y Doctorado entre 2010 y 2014. Sus investigaciones giran en torno a la física de agujeros negros y la cosmología. Desde 2008 es colaborador de la revista *Qué Pasa* (Chile), donde escribe artículos sobre ciencia para todo público.

Ilustración de cubierta
Irene Dubrovsky:
Conexiones aéreas (detalle)



Edelstein, José D.

Antimateria, magia y poesía / José Edelstein, Andrés Gomberoff; con un prólogo de Jorge Wagensberg; edición coordinada por Jorge Mira Pérez. — Santiago de Compostela : Universidade de Santiago de Compostela, Servizo de Publicacións e Intercambio Científico, 2014. — 258 p. ; 19 cm. — (Biblioteca de divulgación. Serie científica ; 1)
D.L. C 1705-2014. — ISBN: 978-84-16183-18-0
1. Antimateria — Obras de divulgación 2. Física — Obras de divulgación I. Edelstein, José II. Gomberoff, Andrés III. Wagensberg, Jorge, prol. IV. Mira Pérez, Jorge, 1968- , ed. lit. V. Universidade de Santiago de Compostela. Servizo de Publicacións e Intercambio Científico, ed.

53

© Universidade de Santiago de Compostela, 2014

Deseño da serie
Servizo de Publicacións e Intercambio Científico, USC

Deseño de cuberta
Ildefonso Vidal Ocampo
Servizo de Publicacións e Intercambio Científico, USC

Maqueta
Marcial Martínez
Imprenta Universitaria

Edita
Servizo de Publicacións e Intercambio Científico
Campus Vida
15782 Santiago de Compostela
usc.es/publicacions

Imprime
Imprenta Universitaria
Campus Vida

Dep. Legal: C 1705-2014
ISBN 978-84-16183-18-0

ÍNDICE

Presentación
Jorge Mira Pérez 7
Prólogo
Jorge Wagensberg 11

REALIDADES INVISIBLES
Antimateria, magia y poesía 19
La ópera del neutrino 29
El portero y el átomo 45
Lúcidas reflexiones de una mosca 55
Todos los caminos 65
La danza de las gotas de aceite 75
Nacido el 4 de julio 85
La partícula que nunca estuvo allí 99
Nada fascinante 109
Que se quede el infinito sin estrellas 119
La irresistible belleza de SUSY 129

IRREALIDADES VISIBLES
Da Vinci contemporáneo 139
Corazón de cuasicristal 149

Biblioteca de Divulgación
SERIE CIENTÍFICA

Nº 1

Colección codirixida por
Francisco Díaz-Fierros Viqueira
Catedrático de Edafoloxía e Química Agrícola, USC
Jorge Mira Pérez
Catedrático de Electromagnetismo, USC

José Edelstein
Andrés Gomberoff

Antimateria, magia y poesía

Con un prólogo de
Jorge Wagensberg

Edición coordinada por
Jorge Mira Pérez

BIBLIOTECA DE DIVULGACIÓN
Universidade de Santiago de Compostela
2014

Clapton y la guitarra eléctrica 159
Un tal Lucas 169
Crisis de información 179
El eclipse y la mariposa 189
La asimétrica vida de Emmy 193
Rompiendo las olas 203
Escatología de la ciencia (y viceversa) 213
Leonel o la ciencia del tiro libre 223
La era del helio 233
Oxígeno para un disidente 241

Agradecimientos 249

Índice onomástico 251

UNA BREVE PRESENTACIÓN

La Universidad de Santiago de Compostela, fundada en 1495, es la principal institución científica de Galicia y ocupa uno de los diez primeros puestos en las principales listas que han evaluado la calidad investigadora en España en los últimos tiempos. Sus casi 3000 profesores y personal científico le otorgan una capacidad de acceso al más alto nivel en cualquier rama del conocimiento y, al mismo tiempo, una posición privilegiada para transmitirlo a la sociedad en un formato divulgativo como el de esta serie científica.

Entre las diferentes áreas del saber, la parte de la física que explora los ingredientes fundamentales de los que se compone nuestro universo demuestra siempre un gran poder de atracción y fascinación. Se trata de una especialidad compleja, que requiere de un alto nivel de abstracción y dominio de la disciplina, como el que tienen los físicos teóricos

José Edelstein y Andrés Gomberoff, autores de esta obra.

Se conocieron en el marco de un congreso sobre gravitación hace más de 20 años y enseguida prendió una llama que fue avivando cada vez más su profunda conexión personal. Tal conexión devino en matrimonio científico, cuyo primer hijo vio la luz en el año 2009 en forma de artículo de divulgación científica en las páginas del semanario chileno *Qué pasa*. Ese primer trabajo, cuyo título da nombre a esta obra, definió el formato en el que han venido trabajando asiduamente desde entonces en ese medio y del que se pueden ver varias muestras en las páginas que siguen.

Es fascinante comprobar cómo dos personas que trabajan en Santiagos distintos, separados por el ecuador, un océano y una gran cordillera, son capaces de mover al unísono una sola pluma para escribir sobre ideas científicas complejas de una manera tan hermosa, autoconsistente y, sobre todo, simple. Estos epítetos no son solo fruto de la emoción de quien suscribe ante la publicación de este libro, sino el veredicto de los distintos jurados que valoraron en su día algunas de sus partes, publicadas en la revista *Qué Pasa*, de las que brotaron después algunos de sus capítulos.

Sin ir más lejos, los tres premios de divulgación concedidos hasta la actualidad en el Certamen del Centro Nacional de Física de Partículas, Astropartículas y Campos (CPAN) en la categoría de artículos publicados en los medios, han ido a parar a las manos del binomio Edelstein-Gomberoff. A igual conclusión llegaron los jurados del II Certamen de la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (FECyT), y del concurso internacional «Ciencia en Acción» (que les concedió menciones de honor), ambos en la categoría de artículos publicados en prensa escrita.

Estamos pues ante una obra que nace con reconocidos galones, honrados aún más si cabe con un prologuista de la talla de Jorge Wagensberg.

No quiero poner punto final a estas líneas sin manifestar mi admiración por la inteligencia y creatividad que emanan los dos autores, que ahora han extendido su simbiosis también al campo de la investigación. Gomberoff, aparte de ser un divulgador reconocido en Chile, es capaz de llevar su genio creador no solo a sesudos trabajos en el campo de la gravitación (donde ha llegado a firmar con el Premio Nobel de Física Frank Wilczek), sino a entretenimientos como la visión desde la física del problema de la custodia de los hijos en parejas divorciadas. Edelstein, que empezó de su mano el camino de la divulgación escrita, ha madurado un estilo propio y ha elaborado entrevistas de referencia a científicos ilustres. Su perfil investigador se instala también en primera fila: como ejemplo, en el momento de escribir estas líneas, acaba de firmar su último trabajo al lado de Juan Maldacena, uno de los líderes mundiales en la física teórica.

Es todo un privilegio para la biblioteca de divulgación científica de la universidad compostelana contar en su nómina con autores de tanto talento.

Jorge Mira Pérez
Coordinador de edición
Codirector de la Biblioteca de Divulgación,
Serie Científica, USC

PRÓLOGO

El arte de comprender la realidad invisible

En este texto mis buenos amigos José Edelstein y Andrés Gomberoff nos llevan de viaje. Es un viaje por las cumbres y las profundidades de la física actual de la mano de dos físicos con las ideas claras. Uno de los rasgos esenciales de la ciencia, pero sobre todo de las grandes ideas de la física fundamental, es la enorme dificultad que tiene el pensador para intuir la realidad. Esa es justamente la grandeza de la física moderna: capacidad para comprender aún cuando casi nada de la realidad se puede intuir. La dificultad viene de que nuestro *sensorium* (con sus aliados instrumentales incluidos, como telescopios o aceleradores de partículas) no alimenta nuestra intuición sencillamente porque la física se interesa por una realidad cada vez más invisible: invisible por pequeña (moléculas, átomos, partículas,...), invisible por rápida (velocidades del orden de la de la luz), invisible por

profusa y compleja (como un gas de alto número de átomos o la simple formación de una complejísima duna de arena), etc. En otras palabras, nuestra intuición lo tiene muy difícil en principio para nutrirse directamente de la observación de la realidad. El mundo de las cosas pequeñas y de los cuerpos rápidos no tienen por qué ser intuitivos en el sentido clásico de la palabra. En esta situación resulta muy difícil idear metáforas como apoyo de nuestro entendimiento. O sea, no podemos rechazar una comprensión del mundo con el único argumento de que no es intuitivo, de que no tenemos donde asirnos. En el universo de la física moderna ya no podemos utilizar la expresión *no lo veo* como sinónimo de *no lo comprendo*. Resulta que no existen observadores cuánticos ni observadores relativistas. Y he aquí la grandeza de la física: podemos comprender sin necesidad de intuir. Podemos comprender la física cuántica, la física relativista o la física estadística sin acceder directa o indirectamente con nuestros sentidos a la realidad cuántica, a la realidad relativista o a la realidad estadística. Pero atención, para conseguir tal cosa hay que ser un poco poeta y no poco filósofo. O tener la suerte de disponer de uno o dos guías que sí lo sean, como los profesores Edelstein y Gomberoff. Su delicado humor, sentido estético e imaginación ayudan en este libro a escalar las cumbres de conceptos muy profundos. Atención alumnos, atención ciudadanos, atención artistas, atención lectores en general... Menciono aquí el universo de los artistas porque estos creadores de (otra forma de) conocimiento están en una situación simétrica: su grandeza consiste justamente en que pueden intuir la realidad sin necesidad de comprenderla. La idea ya se adelanta introduciendo en el título un concepto sofisticado de la física como es la *antimateria* al lado de un concepto tan evocador y sutil como es la *poesía*. A lo largo del texto las ideas de la física moderna rozarán la filosofía (la pregunta de Leibniz y de tantos ontólogos como Heidegger ¿por qué hay algo en lugar de nada?), la estética (relación entre las leyes de la física y las propiedades de simetría del tiempo y el espacio: Emmy Noether), el método científico (las contradicciones aparentes de los neutrinos superlumínicos y la relatividad o el bosón de Higgs largamente buscado y finalmente encontrado), etc.

Hablemos por ejemplo de belleza, un término omnipresente en el libro y un término que esperamos sea también omnipresente en cualquier otra clase de viaje. Siempre me he preguntado por ejemplo cuál debió ser el secreto de Albert Einstein para dar en la diana tantas veces, para ser, con Isaac Newton, el científico que más profundamente ha penetrado en la comprensión de la realidad del mundo. Hoy no se puede trabajar casi nada en física que no arranque de alguna aportación de Einstein. ¿Será que fue un gran observador de la Naturaleza? Pues no especialmente. El comentario

valdría para un naturalista como Darwin, pero no tanto en los temas que tocó Einstein. ¿Será en cambio que fue un gran experimentador? Pues aunque también hizo aportaciones experimentales y técnicas, como patentar una nevera silenciosa o el perfil semicurvado del ala de los aviones, tampoco era especialmente hábil y aficionado al laboratorio. ¿Se debió entonces a una especial habilidad para hacer cálculos o para inventar la matemática que necesitaba? Claramente tampoco. ¿Qué era entonces? Pues algo que se sugiere en varias partes de este libro y con ocasión de referirse a varios grandes físicos: ¡el sentido estético que rige la realidad de este mundo! En efecto, en el fondo lo que inyecta Einstein para aterrizar, tanto en la relatividad especial como en la relatividad general, es su sentido de la simetría del Universo: la realidad puede ser comprensible o incomprensible, observable o no observable, microscópica o macroscópica, estable o inestable, ¡pero no puede ser fea! Con diferente intensidad en la relatividad especial o en la general, Einstein introduce que el conocimiento de la realidad (las leyes fundamentales de la física) no puede depender de cómo y de quién la mire. Así ocurre con las transformaciones de Lorentz para la relatividad especial y con el principio de equivalencia para la relatividad general. Muchos son los grandes físicos y matemáticos que desfilan por este ensayo y que, además son, digamos, grandes estetas (Dirac, Noether, Millikan...).

Creo que todos los héroes de la física muestran aquí, además de su grandeza científica, su dimensión desde el punto de vista de la condición humana. Puedo dar fe de ello de algunos como Richard Feynman, Roger Penrose o Stephen Hawking, que he tenido la suerte de conocer personalmente. Richard Feynman pasa por ser uno de los científicos más agudos e inteligentes de la historia y bien podría atribuírsele la declaración sobre la poseía que en estas páginas aparece en boca de Dirac: «la física se esfuerza en explicar fácilmente lo difícil, la poesía hace lo contrario». Tampoco resulta muy diplomático cuando se refiere a los filósofos, pero leyendo a Edelstein y a Gomberoff uno no puede sino concluir que él mismo tenía mucho de filósofo y de poeta. Con Roger Penrose compartí una larga conversación durante la que tocamos varios temas centrales de la física de hoy. Es matemático pero su cultura científica es de una amplitud sin límites. Emmy Noether es para mí la autora de los teoremas a la vez más bellos y profundos de toda la historia de la física, una heroína que dio clases gratis en la universidad alemana por ser mujer y que luego, cuando los nazis lo prohibieron del todo siguió dándolas aunque entonces ya ¡clandestinamente! en su casa. Y Stephen Hawking, heredero de Newton y de Dirac en la cátedra *Lucasiana* de Cambridge, otro héroe valiente, gran especulador en el buen sentido de la palabra.

Otro detalle muy esencial del libro es lo que transmite del mismísimo método científico. Todo el trabajo está impregnado por ejemplo de un sentido del humor muy especial. Es el que siempre está presente en el quehacer científico. Es el humor que ahuyenta el dogma y que prepara la atmósfera para la crítica. Otro ejemplo está en las dos conmociones que nos ha regalado el CERN recientemente: neutrinos presuntamente superlumínicos desafiando la relatividad (un verdadero susto que ha hecho que algunos se froten las manos aunque durante poco tiempo) y la detección finalmente del bosón de Higgs (cuarenta años después de haberlo predicho). Tampoco se queda sin mencionar la física que se está haciendo en el mismo momento en que el lector abre este libro: las supercuerdas o el sueño de unificar las dos grandes teorías de la física moderna: la cuántica y la relatividad general.

En definitiva, creo que este libro será de los que crean afición, algunos afición a hacer física, otros afición a comprenderla y a nutrirse con sus ideas y métodos para proyectarlo en otras actividades creativas. La publicación de este libro es algo que hay que celebrar. Dos físicos teóricos en activo no siempre tienen la generosidad de escribir física moderna a la vez rigurosa y digerible para cualquier ciudadano.

Jorge Wagensberg
Profesor de la Universitat de Barcelona

Realidades invisibles

ANTIMATERIA, MAGIA Y POESÍA

Dirac estaba sentado en el borde del salón. Observaba minuciosamente los movimientos de su amigo Werner Heisenberg, uno de los padres de la mecánica cuántica, que bailaba con entusiasmo junto a un grupo de mujeres. Era 1929 y ambos estaban a bordo del barco que los habría de llevar a una conferencia en Japón. De pronto vio como Heisenberg se alejaba del grupo y retornaba a su lado. Los dos veinteañeros, que poco después ganarían el Premio Nobel de Física, se miraron unos instantes en silencio. Dirac le interrogó austeramente: «Heisenberg, ¿por qué bailas?». El autor del principio de incertidumbre contestó: «Porque es placentero hacerlo entre chicas tan agradables». Dirac se quedó pensando largos minutos. Abstraído, súbitamente se incorporó y le preguntó: «¿Y cómo sabías de antemano que serían agradables?».

Esta anécdota retrata muy bien al más grande físico británico del siglo XX. Paul Dirac era retraído y de una economía de palabras proverbial, pero de precisión abrumadora, excesiva para una charla

cotidiana. Fue una *rara avis* en este mundo. Una mente capaz de descubrir belleza donde nadie más la veía. Un poeta de la física. En su lápida se lee la ecuación relativista del electrón. Con la precisión y elegancia de un *haiku*, el epitafio grabado en el mármol es su mejor poema, la ecuación de Dirac. No la encontró intentando resolver los enigmas que el mundo natural de su época presentaba. La halló buscando la belleza. En sus propias palabras, «simplemente examinando cantidades matemáticas que los físicos utilizan e intentando darles sentido de manera interesante, sin importar las aplicaciones que el trabajo pueda tener».

Es probable que pocos científicos compartan su visión esteticista de la ciencia, y no les faltan razones para ello, ya que es un lujo que sólo alguien con su profunda intuición e incomparable genio se podía permitir. Nadie es inmune, sin embargo, al hechizo seductor de la simplicidad perfecta de su trabajo. Más allá de la motivación que inspiró su génesis, la ecuación relativista del electrón, en palabras del propio Dirac, «da cuenta de gran parte de la física y toda la química». Fue capaz de describir por primera vez la interacción de la luz y la materia, de explicar varias propiedades hasta entonces misteriosas de átomos y moléculas, y de engendrar su predicción más inquietante: la existencia de antimateria. Para disfrutar de la poesía sintética de Dirac, de su singular capacidad de hilvanar argumentos y ecuaciones con el fin de hacer emerger la belleza que subyace bajo la hojarasca de la diversidad de los fenómenos naturales, como si de un soneto se tratara, pensemos por un instante en el electrón.

El electrón demasiado veloz

El electrón es una partícula fundamental. No está compuesta por nada. Es la unidad básica e indivisible de la carga eléctrica. Posee una masa muy ligera en comparación con la del núcleo atómico, alrededor del cual tiene su paradero habitual. Los electrones son todos idénticos y su única característica distintiva es el llamado espín, que puede pensarse, esquemáticamente, como la posibilidad intrínseca de girar sobre sí mismo. Esto lo puede hacer sólo de dos maneras: en el sentido de las agujas del reloj o en sentido contrario, pero siempre, inexorablemente, con la misma magnitud. A tal punto que ésta constituye una de las cantidades fundamentales de la Naturaleza, que demarca la frontera entre las físicas clásica y cuántica: la constante de Planck. El electrón, decíamos, puede estar tan sólo en estos dos estados. Por ello, cuando a mediados de los años '20 se sentaron las bases de la física cuántica, un electrón debía ser representado mediante dos cantidades matemáticas distintas que dieran cuenta de cada uno de ellos.

En esa época, sin embargo, las leyes de la física cuántica no se ajustaban a los principios de la Teoría de la Relatividad Especial que Albert Einstein había desarrollado en 1905, necesaria para describir objetos que se movieran a velocidades

comparables a la de la luz. Las ecuaciones de la física cuántica, por lo tanto, no eran válidas para describir a un electrón demasiado veloz. Dirac se preguntó cómo debía modificarse la física cuántica para resultar compatible con la teoría de Einstein. Usando el paladar de su concepción estética y argumentos puramente teóricos, matemáticos, elaboró la ecuación que lleva su nombre en un artículo que, bajo el majestuoso título *La teoría cuántica del electrón*, envió a publicar el 2 de enero de 1928. Tenía 25 años.

Si bien el trabajo fue recibido con gran entusiasmo, había un problema evidente en él que no se le escapó al propio Paul Dirac: su teoría contenía, irremediablemente, cuatro cantidades matemáticas independientes y no las dos necesarias para describir al electrón. Para otros científicos esto habría sido razón suficiente para desechar la teoría. Para Dirac, sin embargo, la belleza matemática de ésta constituía una firme evidencia de que debía tener utilidad en el mundo natural. Observó que las dos cantidades extra corresponderían a algo así como electrones de energía negativa. ¿Es esto admisible? En apariencia no. Si una partícula pudiera adquirir valores negativos de la energía se llegaría a un resultado paradójico: un electrón podría proveer energía ilimitadamente a costa de que la suya fuera cada vez más negativa, conservando en el proceso la energía total. Así, un único electrón podría ser utilizado como fuente energética para todo el planeta. Una perspectiva fabulosa, tan seductora como imposible.

La antimateria en el gran teatro del vacío

La ecuación de Dirac arrojaba un resultado absurdo. Pero el irresistible perfume que exhala su perfecta belleza matemática aguijoneaba la creatividad y persistencia de su autor. En un movimiento audaz, Dirac imaginó que, quizás, un electrón no podía tener energía negativa por la sencilla razón de que todos esos estados ya estaban ocupados por otros electrones. El físico austríaco Wolfgang Pauli había descubierto poco antes que dos electrones no pueden estar simultáneamente en el mismo lugar y con el mismo espín, por lo que si los estados estuvieran ocupados, en la práctica sería como si no existieran. Esta ingeniosa solución, sin embargo, tenía graves consecuencias. Dirac estaba sosteniendo en definitiva que el vacío, la ausencia de materia, lejos de ser un silencioso paraíso inabarcable y eterno, se parecía más a un teatro repleto con el cartel de *No hay más butacas*. El vacío, así, estaría lleno de electrones ocupando las infinitas butacas de energía negativa, como un mar sin fondo. El mar de Dirac, por lo tanto, tendría necesariamente carga eléctrica y energía, ¡ambas infinitamente negativas! Nadie estaría dispuesto a aceptar semejante locura. ¿Cómo contrastar una idea tan escandalosamente descabellada como poco intuitiva?

Una forma de poner a prueba la sorprendente propuesta de Dirac es la siguiente. Si existiera ese mar conjetural de electrones de energía negativa, debería ser posible entregarle a alguno de ellos suficiente energía como para llevarlo a tener energía positiva. Si así fuera, dejaría atrás un lugar vacante, un hueco en el mar de Dirac; una butaca vacía porque un espectador abandonó la sala. Notablemente, si lo pensamos un poco, este hueco tiene todas las propiedades de una partícula con carga positiva que se puede mover. La butaca vacía anunciada en la boletería, por ejemplo, atrae espectadores. Tentados por la posibilidad de cambiar de sitio, además, los espectadores pueden reubicarse, uno detrás de otro, en una sucesión que puede describirse, en definitiva, como el movimiento simple de una butaca vacía. Así, el hueco en el mar de Dirac se comporta como una partícula idéntica al electrón, pero de carga positiva.

Si la interpretación inverosímil de Dirac fuera cierta, tendríamos que poder encontrar una partícula con esas características. La primera tentación fue pensar en el protón, como sugirieron Hermann Weyl y el propio Heisenberg en 1929, pero la teoría invariablemente obligaba a que ambas partículas tuvieran la misma masa. El universo conocido no parecía albergar una partícula semejante. Su amigo Heisenberg, decepcionado, llegó a calificar a la formulación de Dirac en una carta a Pauli como «el capítulo más triste de la física moderna». Niels Bohr sostuvo que la audacia del inglés, si bien loable en sus inicios, carecía ya de sentido. Pero Dirac insistió, seguro de que la Naturaleza no dejaría pasar la oportunidad de ser gobernada por leyes tan elegantes, postulando en 1931 la existencia de electrones positivos o anti-electrones como la única interpretación posible de su teoría.

La tensa espera no se prolongó demasiado. El 2 de agosto de 1932, Carl Anderson observó la primera evidencia irrefutable de la existencia de estos electrones positivos o positrones. Era precisamente la partícula que Dirac había predicho. Los positrones son el primer ejemplo conocido de la antimateria. Con el tiempo se concluyó que no sólo los electrones, sino todas las partículas, tienen asociada una antipartícula. Antes de darse a conocer en un experimento, obediente a su sino ineluctable, la antimateria salió a la luz en la página en blanco del vacío, en un audaz y bello soneto urdido por el lirismo y el genio matemático de Paul Dirac.

Feynman y Dirac: magia y belleza

La teoría de Dirac se impuso, pero no por mucho tiempo. Como suele suceder en la ciencia, frente al minucioso y desprejuiciado escrutinio de los detalles, los problemas no tardaron en llegar. Al intentar hacer cálculos más precisos y complejos que involucraran muchas partículas y antipartículas, algo imprescindible en una teoría que predecía la posibilidad de que súbitamente aparecie-

ran en el vacío parejas de electrones y positrones cada vez que un espectador abandonara la sala, los resultados se tornaban absurdos. Se necesitaba una teoría más general, la electrodinámica cuántica, que vería la luz a finales de los '40. Uno de sus creadores fue el célebre físico estadounidense Richard Feynman. Pese a compartir con Dirac el mismo genio y la misma necesidad de belleza, era extrovertido, divertido, excéntrico y seductor. Feynman era a Dirac lo que un electrón a su antielectrón. Según Freeman Dyson, otro de los padres de la electrodinámica cuántica, Feynman no pasaba por los procesos matemáticos ordinarios en sus razonamientos. Era capaz de descubrir cosas como por arte de magia. Podía adivinar las respuestas por un extraño proceso que ni él mismo entendía.

Richard Feynman solía hacer sus cálculos en el *topless bar* de su amigo Angelo Gianone. Llenaba los individuales de papel con fórmulas y bosquejos de las mujeres que bailaban en el escenario. En su primer trabajo sobre el electrón y el positrón, Feynman propuso una nueva interpretación para la ecuación de Dirac. Para él no había energías negativas. Se trataba de electrones que se movían hacia atrás en el tiempo. Llevar energía y carga negativas al pasado es equivalente a llevarlas positivas al futuro, de igual modo en que es equivalente llevar dinero del banco a casa o llevar deuda de la casa al banco. Los positrones eran, así, electrones que

viajaban al pasado. Como en la famosa escena de la película *Yellow Submarine*, cuando los Beatles pasan por el «mar del tiempo», ven un submarino amarillo idéntico al suyo, y John Lennon sugiere que éste no es más que ellos mismos, «viajando hacia atrás en el tiempo».

Grandes científicos, tan dispares como Dirac y Feynman, encontraron en la belleza una motivación esencial para la construcción de sus teorías. Dirac afirmaba que «en sus esfuerzos por expresar las leyes de la Naturaleza», el investigador «debe preocuparse principalmente de la belleza matemática. Debe tomar la simplicidad en consideración, pero subordinada a la belleza». Paradójicamente, él era incapaz de apreciar la poesía. Una vez le dijo a su amigo Robert Oppenheimer: «En la física intentamos explicar, en términos simples, algo que nadie sabía antes. La poesía hace exactamente lo contrario». Feynman, por su parte, se quejaba de un amigo artista que le decía que los científicos reducían todo a elementos básicos, despojándolos de su belleza. Le respondía que, muy por el contrario, él podía encontrar en una flor la misma hermosura que el artista. Sin embargo, también podía apreciar la belleza de sus células, dejarse encandilar por la asombrosa precisión y complejidad de sus procesos biológicos, y rendirse ante los rasgos que ponen en evidencia su historia natural. La belleza, según parece, no es monopolio del arte.

LA ÓPERA DEL NEUTRINO

No es difícil asignarle un papel al neutrino en el montaje de la ópera de las partículas elementales. Renuente a la fama, ensimismado y autista, al neutrino le sienta de perlas el papel de ermitaño. A un costado del escenario, buscando pasar desapercibido, no lleva bien verse empujado tan a menudo a ocupar el lugar del divo, bajo el calor humeante de los focos. Todos caen rendidos ante lo que de tanto en tanto parece querer decir desde su exasperante mutismo. No es para menos. Un par de años atrás, científicos del experimento OPERA anunciaron observaciones que indicaban que estas partículas se moverían a una velocidad mayor que la de la luz en el vacío. Esto no es un detalle menor. De haber sido cierto, se habría transformado en un descubrimiento seminal de la historia de la ciencia. Todo porque una de las teorías fundamentales de la física, la Teoría de la Relatividad Especial, nos dice que nada puede moverse más rápido que la luz.

¿Cómo debemos reaccionar ante un resultado que pone nuestras más íntimas convicciones patas arriba? Para empezar, no hay que alarmarse. Debemos mantener el escepticismo vivo, ya que ha sido éste el combustible esencial del delicado y preciso engranaje de la ciencia, en oposición a la excesivamente generosa credulidad que demandan otros sistemas de conocimiento que imperaron durante siglos. Tal como hace poco ocurrió con la evidencia de vida basada en arsénico o antes con la fusión nuclear fría, la ciencia en ocasiones yerra en sus interpretaciones o pasa por alto fuentes de error en los experimentos, cada vez más sofisticados. Como sea, para poder determinar si la del neutrino era una ópera seria o *buffa*, era necesario esperar más evidencias. Y éstas, contra todo pronóstico, no tardarían en llegar.

El neutrino, ya se ha dicho, es elusivo. Apenas interactúa con la materia. Nos suele atravesar como si nosotros y el planeta entero no fuéramos más que una etérea y fantasmagórica imagen suspendida en el Universo. Por esto requerimos enormes y masivos detectores que aumenten la probabilidad de que alguna interacción tenga lugar. Los enterramos en las profundidades de la Tierra, donde sólo los neutrinos pueden llegar y dejar una impronta de su presencia. Nuestra ópera tuvo lugar bajo los 1440 metros de roca de la montaña Gran Sasso, en los Apeninos centrales de Italia. Pero no comenzó allí.

Desde que el telón se alzó por primera vez en la ópera de las partículas elementales, el neutrino usó todos los artilugios imaginables para evitar las candilejas y dejar que las miradas buscaran al electrón, al protón, o a algún otro miembro de la distinguida familia atómica. Confundiendo en más de una ocasión a los científicos, quizás para preservar su existencia ascética, el neutrino jugó desde los márgenes del escenario, sin embargo, un papel central en la física contemporánea, siendo probablemente la llave que permitió echar luz sobre muchos de sus misterios más insondables. Para aquellos que nos entretuvimos escuchando al tenor y a la soprano, vale la pena desempolvar la parte del guión que, silenciosa pero significativamente, desempeñó el apocado neutrino.

Primer acto: el ladrido que no tuvo lugar

Sherlock Holmes encendió su pipa con calculada parsimonia. El inspector Gregory, de *Scotland Yard*, a quien había sido encomendado el caso, intrigado por las últimas observaciones del detective, añadió «¿Existe algún otro detalle sobre el que desee llamar mi atención?». Holmes se abrió paso entre las volutas de humo. «El inspector Gregory es un funcionario extremadamente competente. Si estuviera dotado de imaginación, llegaría a grandes alturas en su profesión», pensó. En cambio, dijo «Sí, le invito a reflexionar acerca del curioso incidente del perro aquella noche». Visiblemente

sorprendido, el inspector atinó a señalar «Pero... ¡si el perro no hizo nada esa noche!». Los ojos de Holmes se entrecerraron dando paso a una demoledora sentencia: «Ése es, precisamente, el incidente curioso».

¿Puede ser la ausencia de un hecho una pista? El descubrimiento del neutrino es un ejemplo de ello en la historia de la ciencia. Pero el ingenio de Arthur Conan Doyle fue capaz de urdir esta posibilidad 40 años antes en *Resplandor de plata*. En aquellos días, al otro lado del Canal de la Mancha, una brillante joven polaca llamada Marie Sklodowska, rechazada en la Universidad de Cracovia por su condición de mujer, obtenía en la Sorbona los grados de matemática y física. Interesada en las propiedades magnéticas de distintas variedades del acero, comenzó a trabajar junto a Pierre Curie. Un año después, en julio de 1895, Marie y Pierre se casaron y ella comenzó su doctorado bajo la dirección de Antoine Henri Becquerel, profesor de física aplicada en el Departamento de Historia Natural del Museo de Paris. Hijo del descubridor de la célula fotovoltaica y nieto de uno de los pioneros en el estudio de los fenómenos de electroluminiscencia, Becquerel descubrió accidentalmente, en 1896, mientras investigaba la fosforescencia de las sales de uranio, la radiactividad. El novedoso fenómeno concentró de inmediato la atención de la comunidad científica. En 1899, Rutherford demostró que la radiación podía ser de dos tipos distintos

a los que llamó con las letras griegas alpha y beta.

En 1902, Pierre y Marie Curie mostraron que la radiación beta no era otra cosa que la emisión de electrones por parte del núcleo atómico. Éste, recordemos, está compuesto por protones (de carga eléctrica positiva) y neutrones (eléctricamente neutros). La masa de estos constituyentes es casi idéntica y cerca de dos mil veces mayor que la de los electrones (de carga eléctrica negativa) que se mueven alrededor del núcleo. El neutrón es ligeramente más pesado, poco más de un uno por mil de diferencia. La radiación beta, precisamente, se produce cuando un neutrón se convierte en un protón emitiendo un electrón. La carga eléctrica se conserva en el proceso, al convertirse el neutrón en un par de partículas de cargas opuestas. La identidad de un elemento químico viene dada por el número de protones del núcleo atómico. Así, cuando un átomo emite radiación beta transmuta. Se convierte en otro elemento químico. El viejo sueño de los alquimistas.

Uno de los principios sagrados de la física es el de la conservación de la energía. El proceso físico de la radiación beta no puede ser una excepción. Así, la energía del átomo antes de la emisión tiene que conservarse en el proceso. Esto lleva, irremisiblemente, a concluir que el electrón emitido debe tener una energía fija, perfectamente definida. Al igual que podemos determinar completamente la trayectoria que seguirá una pelotita de golf que

soltamos por la ventana abierta de un coche en movimiento, conociendo la velocidad inicial del coche y las masas de ambos. Sin embargo, sorpresivamente, numerosos estudios hechos por Lise Meitner, James Chadwick (el descubridor del neutrón) y otros, mostraron, en 1914, que no es esto lo que ocurre: la energía del electrón emitido varía dentro de un espectro continuo y no tiene un valor fijo y predeterminado. Como si la pelota de golf describiera distintas trayectorias con las mismas condiciones iniciales.

¿Se debía echar por la borda el principio de conservación de la energía? Difícil estar dispuestos a semejante alternativa. Obligaría a repensar y reformular toda la física conocida, desde Newton. Dejando de lado a la radiación beta, todos los experimentos verificaban la validez de este principio. La radiación alfa, que corresponde a la emisión de un núcleo de helio, dócil, lo obedecía sin atenuantes. Niels Bohr, padre de la física cuántica, remedando la perplejidad del inspector Gregory en la búsqueda de una pista elusiva, propuso una hipótesis desesperada: la validez *restringida* del principio de conservación de la energía. Otros, como Debye, sugerían burlonamente que «es mejor no pensar en esto, como pasa con los nuevos impuestos».

Segundo acto: Wolfgang Pauli, detective

El brillo intelectual del físico austríaco Wolfgang Pauli era proverbial. Einstein dijo que entendía mejor la Teoría de la Relatividad tras leer la explicación concisa que Pauli escribió sobre ella para una Enciclopedia. Era temido, en cambio, en los laboratorios de media Europa por lo que pronto se dio a conocer como el *efecto Pauli*. En su presencia los experimentos fallaban inexorablemente. En algunos institutos, de hecho, su visita no era bien recibida. Cierta vez en que un experimento dejó de funcionar sin razón aparente, se buscó alguna traza de la presencia de Pauli allí. Tras un minucioso repaso, alguien cayó en la cuenta de que Pauli había pasado en tren cerca del edificio ese día.

Podía llegar a ser muy arrogante. Paul Ehrenfest le dijo en una conferencia, cuando fueron presentados «Me gustan más los artículos que usted escribe que su propia persona». Pauli respondió: «es extraño, a mi me sucede con usted lo contrario».

Admiraba a Bohr y a tantos otros colegas que parecían dispuestos a poner una mácula en el sagrado principio de conservación de la energía. No obstante, probablemente pensara para sus adentros lo mismo que Sherlock Holmes del inspector de *Scotland Yard*. Todos parecían pendientes del electrón emitido. En él se enfocaba toda la atención. Se investigaban todos los detalles de este producto final del decaimiento beta, cada vez con mayor detenimiento, buscando encontrar la clave de lo que estaba sucediendo. Cuando una partícula emerge de un proceso, deja una señal en los detectores.

Ese es su ladrido distintivo. Lo notable, pues, lo que podría dejar a la luz el crimen casi perfecto, es la ausencia del ladrido. ¿Acaso, se preguntó Pauli, había en esta historia un perro enmudecido, una partícula que pasara desapercibida?

El 4 de diciembre de 1930, Pauli escribió una carta a sus colegas reunidos en Tubinga. Con el ánimo burlón y jactancioso de quien, ante el abismo, se atrevió a dar un paso más que el resto, comenzó su carta con un risible «Queridos damas y caballeros radiactivos». La carta fue leída por un colega. Un sordo temblor en su voz acompañó la lectura de estas líneas: «He dado con un remedio desesperado para salvar al principio de conservación de la energía. Me refiero a la posibilidad de que pudieran existir en el núcleo partículas eléctricamente neutras, de masa muy pequeña, no mayor que el 1% de la del protón, que sean emitidas junto a los electrones, de modo que resulte la suma de las energías de ambos la que está fija, completamente determinada. Esto explicaría que la energía del electrón varíe dentro de un espectro continuo». La solución propuesta por Pauli era sencillamente genial, pero ¿cómo no se habían detectado estas partículas en los experimentos? ¿Debía interpretarse la ausencia de su huella en los detectores como una pista? ¿Se trataría del perro que no ladró cuando todos lo esperaban?

Una de las reglas no escritas de la física teórica señala que uno no debe incorporar elementos

nuevos en un modelo o teoría si no es estricta e inequívocamente necesario. Y Pauli era consciente de que no sería tarea sencilla convencer a la comunidad científica de la necesidad de dar por sentada la existencia de una partícula a la que no se pudiera detectar, «Estoy de acuerdo en que mi remedio puede parecer increíble porque ya deberíamos haber visto estas partículas previamente, si realmente existieran. Pero sólo el que persevera triunfa». La carta continuaba con tono socarrón y enigmático, «Desde ahora, toda solución a este asunto debe ser discutida. Entonces, querida gente radiactiva, vean y juzguen». Y concluía con el aire resignado de quien sabe que no será suficiente con su abrumador prestigio académico para convencer a sus colegas, que a esta altura de la carta estarían intercambiando miradas cómplices de condescendencia, despidiéndose con un lacónico «Vuestro humilde servidor, W. Pauli».

Ni Pauli ni sus colegas tenían claro por qué estas partículas habrían de resultar inmunes a la detección. En 1934, Enrico Fermi escribió la primera teoría del decaimiento *beta* y denominó *neutrino* a la partícula de Pauli. Su existencia recién fue confirmada experimentalmente en 1956 por Frederick Reines y Clyde Cowan, dos años antes de la muerte de Pauli. Como si estuvieran al tanto de la fama que precedía al genial físico vienés, los neutrinos se presentaron en sociedad sólo cuando se consideraron suficientemente a salvo del temido

efecto Pauli. Al recibir la noticia, éste respondió con un escueto telegrama «Gracias por el mensaje. Todo llega para aquél que sabe esperar». Pauli se encontraba en esos días elaborando junto a Carl Jung una teoría acerca de los eventos y su secreta sincronía. Es probable, pues, que le haya dado un sentido providencial a los hallazgos de Reines y Cowan. Es seguro, en cambio, que no llegó a apreciar que, emulando a un célebre detective londinense, convirtió un mudo ladrido en un susurro de la Naturaleza.

Intermezzo: El nieto nacido que no se dejó nacer

Albert Einstein decía que a los 16 años le surgió la idea de alcanzar un rayo de luz. Correr hasta encontrarse con la luz congelada a su lado. Esta posibilidad le parecía tan extraña como imposible. Aseguraba que estos pensamientos adolescentes fueron el origen de lo que terminó siendo la Teoría de la Relatividad Especial. Su primer principio fundamental es que las leyes de la física se ven idénticas desde cualquier laboratorio que se mueva a velocidad constante respecto de cualquier otro (lo que se conoce como sistemas de referencia inerciales). En la jerga científica se dice que la física preserva la simetría de Lorentz. El segundo principio es que la velocidad de la luz es la misma para cualquier observador.

Una consecuencia de estos dos principios es que una partícula capaz de superar la velocidad

de la luz podría viajar al pasado en el sistema de referencia de algún observador. Esto no nos gusta, entre otras razones, porque abre la posibilidad de que podamos comunicarnos con nuestra abuela en 1932 y convencerla de que no vale la pena aceptar la invitación de ese joven pícaro que a la postre será nuestro abuelo. Y si no se llegaran a conocer, nuestra propia vida sería imposible. De modo que no existiríamos en el futuro y, consecuentemente, no tendríamos la posibilidad de viajar al pasado para hacer tan inconveniente sugerencia a nuestra abuela. La posibilidad de contactar con el pasado genera esta clase de paradojas y rompe con la predictibilidad de las teorías científicas. Si fueran más rápidos que la luz, una manzana de neutrinos podría golpear la cabeza de Isaac Newton antes de haberse desprendido del árbol.

Si queremos preservar la causalidad en la física y al mismo tiempo fuera correcto el experimento y la interpretación de OPERA, deberíamos concluir que la física de neutrinos no respeta los postulados de la Relatividad. Teorías de este tipo, que violan la simetría de Lorentz, existen desde hace tiempo en el cajón de sastre de la física teórica. Por ahora como meras especulaciones que se utilizan, con mayor o menor éxito, en el intento de explicar la materia oscura o dar cuenta de otras propiedades exóticas de los neutrinos. Una de las más llamativas, de hecho, es la razón de ser original del experimento OPERA: el estudio de las así llamadas

oscilaciones de neutrinos. Resulta que, según el Modelo Estándar de las Partículas Elementales, los neutrinos vienen en tres sabores: electrónicos, muónicos y tauónicos. Durante algunas décadas se dio por sentado que se trataba de tres partículas distintas, que sólo compartían el hecho de no tener masa, una característica crucial con numerosas consecuencias. Pero a los hechos y milagros de los neutrinos se les aplica la máxima del tango: *todo es mentira*. Los huidizos e irritantes neutrinos no sólo tienen masa (extremadamente pequeña), sino que cambian de identidad sin previo aviso, oscilando de una a otra como si vivieran en un carnaval perpetuo. El experimento OPERA estaba diseñado para investigar minuciosamente cada detalle de este curioso temperamento carnavalesco.

Tercer acto: finale trágico

A pesar de que no era éste el objetivo del experimento, los científicos de OPERA observaron un fenómeno muy curioso. Midiendo con exquisita precisión el tiempo que les llevaba a los neutrinos recorrer los 732 kilómetros que separan, en línea recta por el interior de la corteza terrestre, a la fuente de emisión (en el CERN, ubicado en la frontera franco-suiza, cerca de Ginebra) del detector (bajo la dura roca del Gran Sasso), podían calcular su velocidad. De acuerdo a los investigadores del proyecto, la distancia había sido medida con un error menor a los 20 cm, utilizando la más moderna tecnología GPS.

Los tiempos, por su parte, se habían determinado utilizando relojes atómicos que pueden resolver intervalos de hasta 10 nanosegundos (es decir, la cien millonésima parte de un segundo). El experimento indicaba el sorprendente resultado de que, en su frenética carrera, los neutrinos llegan 60 nanosegundos antes de lo que le llevaría a la luz recorrer el mismo trayecto en el vacío, adelantándose unos 18 metros. Esto es, la velocidad de estos neutrinos sería cerca de un 0.002% mayor que la de la luz. En el trayecto, por otra parte, remedando la facilidad con la que Usaín Bolt gana en las distancias cortas, a los neutrinos muónicos que salen del CERN les da tiempo de convertirse en tauónicos, justo a la medida de lo que pretendían medir originalmente los detectores diseñados en Gran Sasso.

¿Se trataría de un error experimental? ¿Una interpretación equivocada de los datos? Conscientes de las revolucionarias consecuencias que tendría este resultado, bajo cuyo peso los cimientos de la física se harían añicos, los científicos de OPERA revisaron exhaustivamente todas las medidas y se cuestionaron la influencia que tendrían fenómenos tan sutiles como, entre otros, la variación en la distancia recorrida por los neutrinos debida a la deformación que experimenta la Tierra por efecto de la atracción gravitatoria de la Luna. Durante varios meses se debatieron entre presentar los resultados que honestamente habían obtenido o seguir

verificando una y otra vez el experimento, ante la altísima posibilidad de que estuvieran cometiendo un error. Finalmente se inclinaron por lo primero. El enorme interés despertado por los rumores hizo que la conferencia en la que realizaron el anuncio, celebrada en el auditorio principal del CERN, fuera seguida en directo a escala planetaria.

Las mismas miradas suspicaces que acompañaron la lectura de la carta de Pauli volvieron a escena. No dejaba de ser irónico que la partícula elemental menos interactuante de cuantas conocemos, el apocado y solitario neutrino, haya sido responsable con su ladrido ausente de que estuviéramos a punto de tirar por la borda el principio de conservación de la energía y ahora, varias décadas después, con su inopinada prisa ponía en jaque a la Teoría de la Relatividad Especial y la simetría de Lorentz. Nos aventuramos, en su momento, a confiar en que un error sistemático fuera detectado pronto y pudiéramos seguir disfrutando de la belleza indómita y centenaria de las ideas de Einstein. No se trata de que haya vacas sagradas en la ciencia. La razón por la que nos resistíamos a aceptar el resultado de OPERA no es un conservadurismo larvado ni una devoción especial por el genial físico judío. Miles de experimentos anteriores demostraban la validez de la Relatividad en condiciones similares. Esto no quiere decir que ésta no pueda ser refutada, pero es prácticamente imposible que lo sea de la manera sugerida por OPERA.

La fantástica posibilidad de haber encontrado uno de los resultados más importantes de la historia de la ciencia, de hecho, se evaporó en un instante cuando los científicos de OPERA descubrieron con pesar, en la compleja telaraña de miles de cables que conforman la electrónica del experimento, una conexión deficiente que era la responsable del error en la medición del tiempo de vuelo. Corregido éste, los neutrinos volvían a obedecer dócilmente el límite de velocidad universal establecido por la luz. Contra lo que pueda parecer, este episodio pone en evidencia el sólido andamiaje de la física como disciplina. Los miembros de OPERA actuaron honestamente, publicando un resultado que juzgaban correcto. La comunidad científica lo examinó escrupulosamente, acorraló su posible validez desde todos los flancos hasta que el esperado error apareció. El rigor del pensamiento científico salió fortalecido. Es esto, y no la vanidad presuntuosa, lo que habría dejado satisfecho a Einstein.

EL PORTERO Y EL ÁTOMO

Una hormiga camina por el centro del estadio Maracaná ajena al bullicio del graderío. Solitaria, cruza el punto central en el que en unos minutos yacerá el balón para dar inicio a la final del Campeonato Mundial de Fútbol. La imagen, en su gigantesca desproporción, refleja la realidad atómica: si amplificamos un átomo un billón de veces, hasta el tamaño de una cancha de fútbol, el núcleo adoptará la envergadura de una hormiga. A pesar de ocupar tan insignificante espacio, el núcleo da cuenta de casi toda la masa del átomo. El resto son livianísimos electrones que pululan alrededor.

Usos y abusos de la portería

Ésta era la visión del átomo que el neozelandés Ernest Rutherford, en el podio de los más grandes físicos experimentales de todos los tiempos, estableció inequívocamente en su laboratorio de la Universidad de Manchester, en mayo de 1911. Rutherford era un científico pragmático, impaciente frente a los devaneos abstractos. No simpatizaba

con la idea de que existiera algún colega al que se pudiera etiquetar simplemente de *físico teórico*. Para él la ciencia era y debía ser una actividad experimental. Por ello nadie entendía la razón de la excesiva simpatía que prodigaba a un joven danés recién llegado, pese al escaso interés que éste mostraba por los experimentos y aún cuando, además, oponía al empirismo de Rutherford una visión audaz y vanguardista de la ciencia: «cuando se trata de átomos, el lenguaje sólo puede usarse como en la poesía». A pesar de no ajustarse a sus ideales científicos, el brillo de este veinteañero deslumbró a Rutherford. «Bohr es diferente», decía, «¡es un jugador de fútbol!».

Niels Bohr, en efecto, había sido portero del *Akademisk Boldklub* de Copenhague. Tenía talento, pero sus frecuentes distracciones no le permitieron seguir una carrera deportiva. Cuentan que en un partido en el que su equipo dominaba a placer aprovechó la tranquilidad reinante para explorar alguna idea que le pareció fascinante. Sin atender a la máxima: «la puerta que cuidas está abierta de par en par y tu casa, transparente, es de cuerdas y agujeros», buscó el lápiz y un trozo de papel que guardaba, envueltos en una pequeña toalla, dentro de la portería. El gol del rival llegó mientras apuraba un cálculo apoyando el folio sobre la blanca pintura del poste, indiferente al sonoro murmullo de alarma de los espectadores, insuficiente para sacarlo de la introspección en la que estaba sumido.

Su hermano Harald, matemático, tuvo mejor suerte en el deporte. Pasó de compartir equipo con Niels a jugar en la selección danesa en los Juegos Olímpicos de Londres, en 1908. Allí marcó dos goles en el paso arrollador de Dinamarca hasta la final. Harald Bohr tuvo que conformarse con la medalla de plata, sin embargo, tras perder el partido decisivo con Gran Bretaña 2 a 0. El gol definitivo llegó en el inicio de la segunda parte. Fue obra de Vivian Woodward quien al año siguiente, en doce meses, anotaría la friolera de veinticinco goles en encuentros internacionales. Nadie repetiría esa marca por más de un siglo, hasta hace poco más de un año, cuando fue igualada por un tal Lionel Messi.

La carrera futbolística de Niels Bohr no prosperó. ¡Debemos celebrarlo! Su modelo atómico de 1913, junto al establecimiento de las leyes que gobiernan el extraño comportamiento del universo cuántico, son dos pilares fundamentales de la historia del conocimiento humano sin los cuáles casi nada de lo sucedido en la ciencia del último siglo sería posible.

El largo viaje del átomo

No sabemos si Leucipo de Mileto existió. Al igual que ocurre con Sócrates, sólo contamos con referencias de terceros a su vida y obra. Se supone que vivió al sur de la costa amalfitana, en la ciudad de Elea, alrededor del 450ac, en donde fue

discípulo de Parménides y de Zenón. Allí concibió la fabulosa idea de que la realidad está formada por partículas indivisibles, los átomos, siempre en movimiento en el vacío. Suele reconocerse a su discípulo Demócrito como el autor del concepto de átomo e incluso se afirma que el personaje de Leucipo fue inventado por él para dar un barniz de autoridad a su propuesta. Lo cierto es que Aristóteles, quien rechazaba la idea del vacío, enterró este atomismo primigenio por unos cuantos siglos.

Uno de los aspectos maravillosos del saber científico, que produce un vértigo desagradable en quienes no son muy afectos a éste, es la plena conciencia del vasto dominio de lo que desconocemos. Cada avance del conocimiento científico abre nuevas preguntas que eran inimaginables antes de haber alcanzado la modesta certidumbre anterior. Así, en su fuero interno, a pesar de la demanda de resultados inmediatos que preside la ansiedad del hombre contemporáneo, el científico sabe que la paciencia es primordial y que responder a las grandes preguntas puede llevar siglos. Aunque no exista garantía de que toda pregunta tenga respuesta, la experiencia indica que en un gran número de ocasiones lo desconocido y misterioso pasó a ser simple y claro luego de un tiempo. Así, no parece en absoluto descabellado partir de esta premisa de inteligibilidad ante cada nuevo enigma del mundo natural que golpea a nuestra puerta.

La larga noche de la Edad Media sumió las ideas de Leucipo y Demócrito en algo parecido al olvido

por más de dos milenios. No fue hasta comienzos del siglo XIX que los átomos pasaron de ser una mera especulación a transformarse en una idea científica. John Dalton sugirió su existencia para explicar ciertas propiedades de la combinación de los gases. La realidad atómica, sin embargo, no fue aceptada por todos, a pesar de la creciente y abundante evidencia que no cesaba de acumularse a medida que nos acercábamos al siglo XX. Fue Albert Einstein, en su 1905 milagroso, quien dio la estocada final al explicar el movimiento browniano utilizando la teoría atómica. En 1827 el botánico escocés Robert Brown observó que partículas de polen suspendidas en agua experimentaban rápidos y continuos movimientos zigzagueantes. Einstein mostró que se trataba de golpes que recibía de moléculas (grupos de átomos) individuales y fue capaz de calcular varios parámetros experimentales, echando por tierra cualquier nuevo intento de desestimar la teoría atómica.

Tan sólo siete años después, Rutherford había establecido el famoso esquema del átomo que todos conocemos hoy: un núcleo y los electrones girando a su alrededor como planetas. El modelo presentaba, no obstante, un grave problema. ¡Un átomo no podría ser estable! El universo que conocemos colapsaría en una fracción de segundo. De acuerdo a la física clásica —esto es, anterior al siglo XX—, una partícula cargada emite radiación electromagnética al girar y, por lo tanto, pierde

energía. A medida que lo hace, debería ir acercándose al núcleo hasta desplomarse sobre él. En el átomo de hidrógeno esto ocurriría ¡en 13 billonésimas de segundo! Sin electrones en órbita no habría enlaces químicos ni, por consiguiente, moléculas. Algo olía mal en la teoría de Rutherford.

La estabilidad de los átomos

Jorge Valdano dice de los porteros: «Tienes vocación de héroe y ganas de ser distinto: usas ropas estrafalarias y las manos». No podemos evitar conjeturar que la posición en el campo de juego del futbolista Niels Bohr, su «solitario oficio en la otra punta del mundo de la alegría de los goles propios; en el lugar de las glorias enemigas», haya tenido una importancia sustantiva en la formación creativa, en la inteligencia lateral, del físico del mismo nombre. Las grandes ideas son, por lo general, extravagantes, provocativas, y nacen en la fulgente soledad del genio creativo. Una vez enunciadas, superada la sorpresa inicial, tienen el efecto inmediato de resultar evidentes. De haber estado al alcance de cualquiera que hubiera sabido sopesar los indicios manifiestos con la debida atención.

Para Bohr sobraban las evidencias que apuntaban a la existencia de átomos con la estructura sugerida por Rutherford y, contra lo que apuntaban los fríos cálculos clásicos, estaba seguro de que estos debían ser estables. Algo debía fallar en la línea argumental. ¿Y si no era la idea de Rutherford? Hacía falta una audacia abrumadora para atreverse siquiera a sugerirlo: quizás lo que estaba mal era la física clásica. Esto es, todo el edificio teórico conocido hasta ese momento. Bohr sabía que funcionaba muy bien, desde escalas milimétricas hasta el sistema solar. Pero ¿quién podía asegurar que a distancias ínfimas, como aquellas en las que se desarrolla la realidad atómica, las cosas tuvieran un comportamiento similar? ¿Cómo modificar la física de modo que diera cuenta de estos aspectos novedosos del universo atómico sin perder su capacidad predictiva a las escalas de la física clásica? Era un proyecto demasiado ambicioso que necesitó una década y el concurso de otras mentes privilegiadas para completarse.

Bohr se conformó con emprender la búsqueda de reglas simples que la nueva física, aún por conocerse, debiera implicar para los átomos. Para él estaba claro que los electrones no podían perder energía poco a poco, en su incesante girar alrededor del núcleo. Una pérdida gradual sería imposible si la Naturaleza vetara la opción de que la energía de los electrones pudiera tomar cualquier valor. Imagine que va en un coche a 100km/h y quiere disminuir la velocidad a la mitad. Al accionar el pedal, el vehículo frenará gradualmente pasando por todas las velocidades posibles, desde la inicial hasta los 50Km/h. Pero ahora imagine que alguna extraña ley de la física automotriz no permitiera ninguna velocidad intermedia,

estableciendo que un coche sólo puede marchar a velocidades que sean múltiplos de 50Km/h (en la jerga científica diríamos que la velocidad está *cuantizada*, en *cuantos* o unidades de 50km/h). Un freno compatible con esa ley sería un mecanismo drástico que nos llevaría de los 100km/h originales a la mitad de forma instantánea, algo no muy confortable para los ocupantes del vehículo. Análogamente, valiéndose de una simple e ingeniosa ecuación, Bohr postuló la *cuantización* de las órbitas atómicas. Así, dada una órbita, no existe ninguna otra que esté suficientemente cerca. De modo que, si bien un electrón en un átomo puede cambiar de órbita, no puede hacerlo de manera gradual. Como corolario de esta disparatada idea, existiría una órbita mínima por debajo de la cuál no sería posible caer. Así, los átomos serían estables por el mero hecho de estar sujetos al capricho *cuantizador* de Niels Bohr.

En los primeros años del siglo XX, Max Planck y Albert Einstein habían mostrado que la energía de la luz tampoco admitía cambios graduales. Se presentaba en paquetes a los que llamamos fotones, o partículas de luz. Si la energía entre dos órbitas atómicas era igual a la de cierto fotón, el átomo podría absorberlo y el electrón saltar de una órbita a la otra. Y viceversa, un electrón que cayera de una órbita a otra más baja emitiría un fotón, cuya energía resultaría ser exactamente la diferencia de las correspondientes a cada órbita. Si tomamos un

gas, digamos, de átomos de helio, y aplicamos una fuerte descarga eléctrica capaz de arrancarles algunos electrones, la atracción eléctrica los hará retornar al núcleo. En el camino, pasarán por órbitas sucesivas, emitiendo fotones de energías características del helio. La energía de los fotones determina el color de la luz. Así, la luz emitida constituye la *huella dactilar* exclusiva del helio. Esto llevó a que se pudiera comprobar muy pronto, de manera incontestable, la constitución química de las estrellas, descomponiendo la luz radiada por éstas a través de un prisma, como en la tapa del disco *El lado oscuro de la luna* de Pink Floyd. Un ligero corrimiento al rojo de todo el patrón delató, ni más ni menos, que la expansión del Universo.

La construcción de una teoría que brindara un marco robusto al principio de *cuantización* de Bohr, haciéndolo además compatible con la física clásica, llevó unos años y requirió de la intervención de gigantes como Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, Paul Dirac y Max Born. Su formulación es inusualmente abstracta y contraria a la intuición, dando lugar a situaciones paradojales, inexplicables en el contexto de las teorías físicas y los marcos filosóficos previos a la vuelta de tuerca de Bohr. Una idea tremendamente simple, escandalosamente atrevida, y de consecuencias tan enormes como inesperadas. A esta extravagante teoría que hoy llamamos Mecánica Cuántica le debemos la electrónica moderna, la computación y

la práctica totalidad de la tecnología en la que estamos inmersos. Y todo tuvo como impulsor principal e irremplazable a un distraído ex-portero danés que supo legislar en el universo de los átomos con virtudes de estadista.

LÚCIDAS REFLEXIONES DE UNA MOSCA

Hay pocas cosas tan maravillosamente mágicas como una ventana. Desde el silencio y la comodidad del salón, contemplamos el estallido violáceo que nos regalan los floridos jacarandás de la calle. La rigidez del vidrio que nos aísla del exterior parece un fantasma inmaterial para los rayos de luz que la atraviesan impasibles. Una mosca atrapada en el interior intenta imitarlos infructuosamente. Ignorante de los principios de la Mecánica Cuántica, se golpea una y otra vez la cabeza contra lo que constituye para ella una barrera infranqueable. Nos resulta divertido el esfuerzo inútil del insecto, suponiéndolo producto de su ingenuidad. Un único impacto debería ser suficiente para comprender la conveniencia de un cambio de estrategia. Los pensamientos de la mosca, sin embargo, quizás sean merecedores de mayor atención.

Sucede que cuando miramos a través de la ventana no sólo vemos el exterior. Podemos ver, además, una reflexión especular de nosotros mismos.

Así, cuando saludamos al vecino que pasea por la vereda, además de confirmar con un golpe de vista que sigue sin afeitarse los afrancesados bigotes, vemos superpuesta una imagen tenue de nuestro gesto desaprobatorio en el cristal. Y es que la luz no siempre atraviesa el vidrio. Parte de ella se refleja. Es lo que se conoce como reflexión parcial de la luz. La mosca podría pensar, por lo tanto, que sólo ha tenido mala suerte. Que sus continuos choques con el vidrio son similares a los que experimenta esa porción de luz que se refleja. Pero que tarde o temprano tendrá la suerte de aquellos otros rayos, los que atraviesan la ventana. Esos que llevaron la alegría arbórea de las veredas de nuestro barrio al salón de nuestra casa.

Newton y la luz

Isaac Newton pensaba que la luz estaba compuesta de partículas. Imaginaba un rayo de luz como un caudal de pequeños corpúsculos. Una visión que hacía de la reflexión parcial un fenómeno particularmente misterioso. Una partícula fundamental es indivisible. No puede un trozo de ella seguir un camino mientras el resto sigue otro. «Acaso algunos corpúsculos reboten mientras otros siguen de largo», razona la mosca. De ser así, lo que suceda microscópicamente con cada corpúsculo de luz al llegar al vidrio es de capital interés para ella, espoleada por sus ansias de libertad.

La primera idea que se le viene a la cabeza es desesperanzadora. Quizás el vidrio es un material

poroso y las partículas de luz pasan por sus minúsculos agujeros, inservibles para ella. La reflexión parcial sería consecuencia de que no todos los corpúsculos que forman parte de un rayo de luz le aciertan a un agujero. Una idea atractiva pero errónea. El propio Newton concluyó que esto no podía ser así. En el segundo libro de su obra *Opticks* consideró esta posibilidad. La proposición XIII dice claramente: «La causa de la reflexión no es la incidencia de los rayos de luz en las partes sólidas o impenetrables de los cuerpos, como se cree comúnmente». La mosca puede sentir el consuelo de compartir su fallida teoría con el resto de los humanos del siglo XVII.

Sepultando toda duda, Newton brindó siete razones distintas para objetar este punto de vista. Revisemos sólo dos.

Primero, la reflexión de la luz no ocurre sólo cuando, viniendo desde el aire, digamos, incide sobre el vidrio. También ocurre en la situación inversa, cuando un rayo de luz se propaga dentro del vidrio e incide sobre la superficie que lo separa del aire. A este fenómeno se lo denomina reflexión interna. Puede observarse fácilmente en una piscina. No sólo nos reflejamos en la superficie del agua al mirarla desde afuera. Si nos sumergimos y la miramos desde abajo, también veremos reflexiones. De hecho, éstas suelen ser más intensas. Este fenómeno es aprovechado en tecnologías como la fibra óptica, en que un rayo de luz es conducido a

través de un cable plástico transparente, reflejándose cada vez que llega a sus bordes.

Para Newton esto era una evidente muestra de que la teoría de los agujeros no podía ser cierta. No era razonable pensar que el aire tuviese una porosidad similar a la del vidrio. Más aún, la reflexión interna era incluso más pronunciada si se utilizaba una bomba de vacío para evacuar el aire, cuando uno esperaría el fenómeno inverso.

Opacidad y transparencia

Una segunda razón provenía de la experiencia de Newton en el pulido de lentes. Un vidrio mal pulido es opaco. A medida que vamos afinando el tamaño de la lija, el cristal se va haciendo transparente hasta llegar a una claridad óptima. Pero aún el pulido más fino ocurre a una escala mucho más gruesa que aquella de los supuestos poros del material. El vidrio sigue siendo a nivel microscópico una superficie muy irregular, por lo que la posibilidad de pulir un vidrio hasta hacerlo transparente parece contradecir la teoría de la porosidad.

Intentando comprender la naturaleza de la luz, Newton repitió en 1717 una curiosa experiencia realizada por Robert Hooke unas décadas antes. Fabricó una lente con un lado plano y otro esférico, la apoyó sobre una superficie clara y la iluminó verticalmente. El resultado fue una secuencia de círculos concéntricos de luz y sombra que hoy se conocen como anillos de Newton. Agudizó al

máximo su indiscutible genio para la ardua tarea de reconciliar este fenómeno con su teoría corpuscular de la luz. Ya no se trataba sólo de la transparencia de la lente. El fenómeno observado era mucho más complejo. Un puzzle en el que los corpúsculos de Newton no parecían encajar.

El genial catedrático de Cambridge se veía impotente y derrotado por su terco afán de aferrarse a una teoría que ya había sido abandonada en Europa. El holandés Christiaan Huygens había comunicado a la Academia de Ciencias de Paris, en 1678, su teoría de la luz según la cuál ésta no estaba compuesta por partículas sino que se trataba de un fenómeno ondulatorio como el sonido. La reflexión parcial de las ondas no reviste ningún misterio. Las ondas no son indivisibles y pueden distribuir su energía en distintas direcciones al encontrar un obstáculo. La teoría de Huygens de la luz daba perfecta cuenta de los anillos de Newton, ya que las ondas pueden tener interferencia destructiva cuando el máximo de una se encuentra con el mínimo de otra, generando una región de sombra. Cuando el escocés James Clerk Maxwell demostró que la luz era una onda de campos eléctricos y magnéticos, la teoría corpuscular de Newton llevaba casi dos siglos abandonada.

El empleado de patentes y la luz de Newton

«Corpúsculo viene de cuerpo», pensó la mosca, entristecida al comprobar el nulo carácter ondula-

torio de su organismo. Pero sus esperanzas renacieron al escuchar hablar de los resultados de un bello experimento realizado por Heinrich Hertz en 1887, en el que mostraba que era más fácil generar un arco voltaico (una chispa, como en una bujía) entre dos terminales eléctricos cuando estos eran iluminados. La luz era capaz de arrancar electrones de los metales, haciendo posible la conducción eléctrica. El experimento se fue sofisticando con el tiempo, hasta que se pudo observar un aspecto extraordinariamente peculiar de este fenómeno que le devolvió a la mosca el alma al cuerpo.

De acuerdo a la teoría ondulatoria de la luz uno esperaría que, al aumentar la intensidad, la cantidad de electrones liberados en el experimento de Hertz y la velocidad con la que son emitidos aumente. Del mismo modo en que las palmeras de una playa son arrancadas de cuajo por un tsunami pero se mantienen firmes, en su sitio, cuando las alcanza el oleaje. Sin embargo, por sorprendente que parezca, esto no es lo que ocurre. Si se ilumina el metal con luz de mayor longitud de onda, lo que comúnmente llamamos luz infrarroja, el fenómeno desaparece por completo, ¡sin importar la intensidad! Como si se tratara de un tsunami inocuo ante el que los electrones permanecen indiferentes. Al disminuir la longitud de onda, llevando la luz hacia el ultravioleta, el arco voltaico se produce en un momento preciso, distinto para diferentes metales.

Esto no parece tener ningún sentido. La longitud de onda de la luz es lo que el ojo humano percibe como su color. ¿Por qué los electrones habrían de elegir dar un salto al vacío desde el interior de un metal sólo cuando son iluminados por determinados colores, sin importar la intensidad de la luz? El misterio de este fenómeno se desplomó bajo la mente prodigiosa de un joven empleado de patentes que, en 1905, vino a decir que Newton, después de todo, tendría razón. La luz, al menos en ciertas circunstancias, se comporta como una partícula, a la que hoy llamamos *fotón*. La explicación que Albert Einstein dio al fenómeno observado por Hertz, conocido como efecto fotoeléctrico, es que los fotones asociados con la luz de mayor longitud de onda tienen menos energía. Así, un fotón rojo es menos energético que uno azul.

Para arrancar un electrón del metal, éste debe ser golpeado por un fotón suficientemente energético. Del mismo modo en que la guillotina es efectiva cuando cae desde cierta altura produciendo un golpe seco y no ocasiona más que un rasguño si se deja caer tantas veces como uno quiera pero a un milímetro del cuello, un fotón muy energético no puede ser reemplazado por un número grande de fotones de baja energía. La explicación de Einstein, quien al mismo tiempo hacía añicos buena parte del legado científico de Newton, le hizo merecedor del premio Nobel y permitió desempolvar nuevamente la teoría corpuscular de la luz,

haciendo retroceder dos siglos nuestra comprensión. En apariencia.

La luz de Feynman

Hermanada nuevamente con la luz en su condición de corpúsculo, la mosca se apresta a impactar el cristal con todas sus fuerzas. Sin embargo, temerosa del resultado, prefiere darle una vuelta más al asunto. No es que desconfíe de Einstein pero hay algo que no le cuadra, que no acaba de entender. Si la luz es corpuscular, ¿cómo explicar los anillos de Newton? Más sencillo aún, ¿cómo explicar su propia imagen reflejada en la ventana? La mosca tuvo la repentina certeza de encontrarse frente a una paradoja. La luz era una onda. Pero también un corpúsculo. Sin saberlo, el curso de su pensamiento siguió los mismos pasos que el de un grupo de jóvenes físicos que supieron ver en la explicación que Einstein dio del efecto fotoeléctrico el inicio de una revolución científica: el nacimiento de la física cuántica.

La única explicación posible que conocemos para la reflexión parcial de la luz, siendo ésta un corpúsculo, llegó demasiado tarde para saciar la curiosidad de Newton. Es improbable, en cualquier caso, que una respuesta como la que brinda la física cuántica hubiese conformado al irascible genio inglés. De hecho, en cierto sentido, la respuesta no dejó tranquilo a nadie. Richard Feynman, quien ganó el premio Nobel por sus contribuciones a la

física cuántica de la luz (electrodinámica cuántica), afirmaba «puedo decir con certeza que nadie entiende la física cuántica». Es que la solución al dilema es que el fotón llega al vidrio y toma ambos caminos simultáneamente (el que lo atraviesa y aquél en el que rebota). Cuando un observador lo busque, sin embargo, lo encontrará sólo en un lugar. La física solo puede decirnos la probabilidad de encontrarlo a cada lado del vidrio. «La electrodinámica cuántica describe la naturaleza como absurda desde la perspectiva del sentido común», decía Feynman. «Pero está totalmente de acuerdo con los experimentos. Así que espero que acepten a la naturaleza tal como es: absurda».

TODOS LOS CAMINOS

Hagamos un experimento. Imaginemos que nos colocamos a cierta distancia de una superficie plana, digamos, una pared blanca y limpia. Entre nosotros y la pared interponemos un panel negro que no nos deja ver ni un resquicio de lo que está detrás. Ahora realizamos un corte en el panel, dos ranuras delgadas, verticales y paralelas entre sí. A través de ellas, claro, vemos dos finos trazos de la superficie nívea. Nos colocamos de manera que las ranuras estén dispuestas simétricamente, frente a nosotros. Sacamos una ametralladora de pequeñas bolitas de pintura roja y con los ojos vendados disparamos una caudalosa ráfaga, como Tony Montana en el final de *Scarface*, al tiempo que repetimos su ya clásico «Say hello to my little friend!».

Al quitarnos la venda está claro lo que nos encontraremos. El panel manchado de pintura por todos lados. Pero lo interesante está en la pared. Allí veremos dos segmentos rojos verticales, que replican a las dos ranuras, separados entre sí un

poco más que éstas. Estos trazos estarán dispuestos exactamente en aquella parte de la pared que podíamos ver a través de las ranuras. La explicación, creemos, es muy sencilla. Esas líneas rojas son el producto de aquellos proyectiles que, siguiendo una línea recta, lograron pasar por las ranuras. Todas las manchas del panel corresponden a aquellos que no pudieron vencer el obstáculo. Concluimos, por último, que nada cambia si repetimos el experimento sin vendarnos los ojos. Si fuéramos capaces de ver la trayectoria de cada proyectil, confirmaríamos nuestra hipótesis y nos daríamos por satisfechos.

Sabemos que las bolitas de pintura están hechas de moléculas y éstas de átomos. Estos, a su vez, tienen un núcleo y electrones a su alrededor. Decidimos, entonces, hacer el mismo experimento pero en versión bonsái, usando electrones como proyectiles y un par de ranuras de dimensiones atómicas. Estamos seguros de conocer el resultado, pero no podemos reprimir el deseo de repetir lo anterior en miniatura. Calentamos un filamento metálico y con una batería conseguimos el efecto buscado, disparar electrones a mansalva. Tras un instante, desconectamos la batería y vemos lo ocurrido.

La pared había sido preparada previamente para que los electrones dejaran su huella: pintada de negro, el impacto de estos se vería blanco. Al sortear el panel, sin embargo, nos encontramos

con una imagen sorprendente: en lugar de toparnos con las dos ranuras blancas verticales, una mancha blanca y dilatada domina la escena en el centro de la pared. A ambos lados, un sector de la pared ligeramente más angosto se mantiene oscuro. Luego un tramo claro, un poco menos intenso y menos ancho que el del centro y así sucesivamente. Una sucesión de claros y oscuros, cada vez menos intensos y menos anchos. ¿Cómo puede ser? ¿En qué momento de la miniaturización dejó de comportarse la materia como lo hacían las bolitas de pintura iniciales?

Ondas y senderos que se bifurcan

Desconcertados, decidimos realizar un nuevo experimento. En lugar de partículas utilizamos ondas. Sustituimos la ametralladora por un parlante que emite una nota pura y constante. Un conjunto de micrófonos desplegados en la pared medirá la intensidad del sonido en cada punto de ésta, dejando una marca de color proporcional a la misma. Un instante después, vemos el resultado y nos sorprende que éste sea idéntico al obtenido con los electrones. La única diferencia es que ahora entendemos lo que sucede.

Las ondas de sonido son oscilaciones de la presión del aire, como las olas del mar lo son del agua. Al igual que ellas, tienen máximos y mínimos que interfieren al encontrarse. Si la cresta de una ola se superpone a un valle, la intensidad de

la onda se anula. Por el contrario, si dos crestas o dos valles se superponen la intensidad se duplica. La onda pasa simultáneamente por las dos rendijas. De hecho, cada una de ellas se convierte en sí misma en un foco de emisión, como si fuera un pequeño parlante imaginario. Cada vez que dos crestas se superponen sobre la pared, los micrófonos registran un máximo de intensidad.

Si el oleaje es continuo, es evidente que dos crestas recorrerán la misma distancia para encontrarse en el centro de la pantalla. Eso explica la mancha dilatada del centro. Asimismo, una cresta puede encontrarse con aquellas que marchan detrás en el tren de ondas que sale de la otra ranura, en posiciones de la pantalla en las que la distancia que ambas recorren es la misma, y ése es el origen de los tramos coloreados que aparecen más alejados del centro, en ambas direcciones. Los sectores oscuros resultan del encuentro de las crestas con los valles. Así se forma un patrón de interferencias que es la huella dactilar del fenómeno ondulatorio. De hecho, fue este mismo experimento el que hizo el gran científico británico Thomas Young en 1803 para derribar la agonizante teoría corpuscular de la luz de Newton y mostrar que se trataba de una onda, como ya muchos teóricos pregonaban.

¿Ondas o partículas? ¡Ondas y partículas!

Rendidos a la evidencia, estamos dispuestos a concluir, siguiendo a Young, que los electrones son

ondas. Pero sabemos que no lo son. Podemos manipularlos uno a uno, ver sus trayectorias en una cámara de burbujas o medir su presencia en las gotas de aceite del experimento de Millikan, como veremos más adelante. Sin embargo, el patrón de interferencia que observamos en la pared es señal inequívoca de que los electrones pasaron por ambas ranuras. No hay otra posibilidad. ¡Claro!, pensamos, el comportamiento ondulatorio probablemente tenga su razón de ser en el torrente de electrones, al igual que millones de gotas forman un fluido que puede tener olas, a pesar de que una sola de ellas no las presenta.

Decidimos despejar nuestras dudas lanzando electrones de uno en uno. Así, razonamos, podremos saber realmente cómo se están comportando. Luego de cada impacto observamos la pantalla y lo que sucede es aún más sorprendente y misterioso. Vemos las marcas que cada electrón deja en la pantalla. Al comienzo prestamos atención al hecho de que éstas resultan ser puntos, confirmando la imagen que tenemos de ellos como trocitos mínimos de la materia. Sin embargo, a medida que se acumulan las marcas, vemos que poco a poco se va formando un patrón: ¡el mismo patrón ondulatorio que dejó el haz del primer experimento! Como si se hubieran puesto de acuerdo en una conspiración inverosímil, los electrones, uno a uno, dejan una marca puntual pero construyen un patrón ondulatorio. Esto último indica, de manera

categórica e inequívoca, algo espeluznante: cada electrón pasa indefectiblemente por las dos ranuras al mismo tiempo, de modo de poder interferir consigo mismo.

Sin saber si nos encaminamos a aclarar algo o a ensanchar la magnitud de nuestro desconcierto, hacemos una tercera ranura en el panel y repetimos el último experimento. El patrón de la pared nos indica que cada electrón, esta vez, ha pasado por las tres ranuras al mismo tiempo. Hacemos una cuarta ranura, una quinta... diez, cien, mil, y cada electrón pareciera muy a gusto pasando por todas ellas a la vez.

Todos los caminos conducen al desconcierto

Ebrios de excitación y sorpresa, decidimos aumentar la apuesta, agregando un segundo panel un poco antes del que ya teníamos. Trazamos las ranuras correspondientes y el resultado es desquiciante: no importa cuántos paneles pongamos ni cuantas ranuras hagamos en ellos, cada electrón, partícula subatómica que podemos encontrar en cualquier átomo de la materia, como si se burlara de nosotros, se comporta como si pasara por todos los caminos que se ponen a su disposición. Absolutamente todos. Explora todas y cada una de las ranuras de todos y cada uno de los paneles.

Nada nos impide imaginar algo estremecedor. Un plano paralelo al panel, en el que no hay nada más que aire, puede pensarse como un panel con

infinitas ranuras. De modo que si pensamos en la totalidad del espacio que separa al filamento metálico emisor de los electrones de la pantalla como un continuo de planos paralelos, como si lo dividiéramos en rebanadas de ínfimo espesor, estaríamos en la situación en que tenemos infinitos planos con infinitas ranuras. La conclusión es espectacular: un electrón moviéndose entre el filamento metálico y la pantalla recorre todos los caminos, posibles e imposibles, y todos al mismo tiempo. Este rocambolesco comportamiento destierra, de una vez y para siempre, a la noción de trayectoria del universo cuántico. Pero no todos los caminos son igualmente importantes. Los que más se parecen a lo que haría un proyectil clásico son los que tienen mayor peso en esta alucinante sumatoria de recorridos que alberga la naturaleza errante y errática de los electrones.

El estudio de la realidad del universo subatómico siguiendo estas ideas se conoce como la formulación de la *integral de caminos* de la Mecánica Cuántica. Esta expresión quiere decir, precisamente, que para entender un fenómeno en estas escalas debemos sopesar todas y cada una de las posibilidades, aunque no contribuyan todas ellas con la misma probabilidad. Una analogía insatisfactoria pero oportuna la brinda la vida de un ser humano: sabemos que nacerá y que morirá, pero entre estos dos eventos, a priori, todas las contingencias son posibles. En el momento de su nacimiento, ese

individuo podrá llegar a ser emperador, mendigo, cantautor, labriego, cirujano o poeta surrealista. Aunque está claro que las probabilidades de cada una de esas eventualidades no es la misma para distintas personas y tiene, entre muchos otros, condicionantes culturales y socioeconómicos. Sólo estamos seguros de que cualquier individuo que nació, inexorablemente morirá. La diferencia es que la persona sólo seguirá uno de esos derroteros. El electrón, en cambio, será emperador y mendigo, cantautor y labriego, cirujano y poeta surrealista, y todo lo que se pueda ser.

Las primeras piedras de esta construcción teórica fueron obra de Paul Dirac, pero el magnífico edificio conceptual, una joya resplandeciente del tesoro de las ideas más brillantes de la ciencia, tuvo como arquitecto a un joven desenfadado y extrovertido llamado Richard Feynman.

Puerta de entrada a la perplejidad cuántica

Todo lo explicado hasta este punto es exactamente lo que muestran los experimentos, por muy inverosímil que parezca. Pero reservemos una pizca de nuestra capacidad de asombro porque aún nos espera la mayor de las sorpresas. Volvamos al panel único con dos ranuras. Supongamos que instalamos un dispositivo en una de ellas, el cual, aún dejando pasar a los electrones, detecta sin margen de error su paso por allí. Queremos verificar esta incomprensible realidad de los infinitos caminos y

para ello observamos detenidamente lo que ocurre en una de las rendijas. Previniendo la llegada de emociones fuertes, tenemos a mano dos medidas de *Lagavulin* añejo.

Los electrones son lanzados uno a uno y en nuestra bitácora apuntamos por cuál ranura han pasado, según la reacción del detector que acabamos de introducir. Comprobamos que lo siguiente ocurre para todos y cada uno de ellos. O bien el detector delata el paso por la ranura en la que se encuentra y el electrón acaba impactando en la pared en el sitio justo en el que la bolita de pintura lo habría hecho, o el detector no se activa, delatando su paso por la otra ranura y, en efecto, el impacto se produce en el otro segmento vertical marcado por las bolitas de pintura. ¡Ahora los electrones se comportan como partículas! El sólo hecho de observar por qué rendija pasan ha modificado el resultado del experimento. ¿Extraño? Bienvenido al universo cuántico.

LA DANZA DE LAS GOTAS DE ACEITE

Fue durante los primeros años del siglo XX cuando Robert Millikan decidió que ya era hora de hacer algo importante en física. Algo que lo llevara a un sitial de honor en la historia de la ciencia. Estaba a punto de cumplir 40 años y no había publicado ningún resultado científico por el que pudiese ser recordado. Llevaba una larga década dedicado fundamentalmente a la docencia. Era un gran profesor. Había escrito varios libros de texto, populares entre académicos y estudiantes por su refrescante y poco convencional mirada de la física. Empujado por su firme voluntad de trascendencia, Millikan consiguió torcer su destino en tan sólo cinco años.

El 2 de junio de 1913 firmó la publicación que haría realidad sus anhelos de gloria. Aparecería poco tiempo después en la prestigiosa revista *The Physical Review*, y se transformaría rápidamente en un clásico. Su título: *Sobre la carga eléctrica elemental y la constante de Avogadro*. El artículo

era definitivo respecto a la existencia de una carga eléctrica elemental: la del electrón. Millikan pudo medirla con un error inferior al 0.2%. Todo en la naturaleza debía poseer carga eléctrica en múltiplos enteros de este valor fundamental. La existencia de *sub-electrones*, partículas con carga eléctrica menor que la del electrón, que el controvertido físico austríaco Felix Ehrenhaft decía haber detectado, quedaba así descartada.

Millikan recibiría el premio Nobel de física en 1923 gracias a este experimento, uno de los diez más hermosos de la historia de la ciencia según una encuesta hecha hace algunos años por *The New York Times*. Ese mismo año, un joven que acababa de cumplir los 21 comenzaba su doctorado en la Universidad de Cambridge. Ya había sido aceptado en el *St. John's College* de esta universidad dos años antes, pero la beca que le habían otorgado era insuficiente para afrontar el costo de vida allí, de modo que aprovechó ese período para sumar un grado en matemática al que ya tenía en ingeniería eléctrica. Era Paul Dirac.

La danza de las gotas de aceite

El electrón había sido descubierto por Joseph John Thomson en 1897. Hacía décadas que se conocían y utilizaban los tubos de rayos catódicos, incluso para realizar demostraciones públicas de gran impacto visual, pero nadie entendía a ciencia cierta de qué estaban hechos. Se veían afectados

en presencia de un imán, de modo que estaban cargados eléctricamente, pero su masa era más de mil veces menor que la del átomo más liviano. Thomson aventuró la posibilidad de que se tratara de partículas que constituyen a los átomos, en una época en la que se pensaba que estos eran indivisibles, y fue capaz de medir con mucha precisión la razón entre su masa y su carga eléctrica, pero no estas cantidades individualmente. Una medición cuidadosa de la carga eléctrica implicaba, por lo tanto, entre otras cosas, poder conocer su masa. Para Millikan era el desafío perfecto.

El experimento que ideó es simple e ingenioso. Consta de dos placas paralelas metálicas que se disponen horizontalmente. Por un agujero de la placa superior se dejan caer pequeñísimas gotas de aceite producidas por un atomizador. Allí se encuentran con una atmósfera de aire ionizado mediante rayos X; es decir, aire a cuyas moléculas se les arrancaron algunos electrones con el propósito de que estos sean capturados por las minúsculas gotas. El movimiento de éstas es observado a través de un pequeño microscopio. Si se conecta una batería entre las placas, el campo eléctrico producido es capaz de frenar su caída e incluso empujarlas hacia arriba. Estudiando el movimiento de las gotitas mientras se conecta y desconecta la batería, Millikan fue capaz de determinar la carga eléctrica acumulada en cada una de ellas. Inexorablemente, ésta resultaba ser un múltiplo de una unidad de carga elemental.

La idea del experimento nació en una conversación que mantuvo con Louis Begeman, profesor en Chicago, y con Harvey Fletcher, un estudiante que buscaba un tema para desarrollar su tesis doctoral bajo la dirección de Millikan. Hablaron de los intentos de medir la carga eléctrica que Thomson y sus colegas habían realizado en Cambridge. Era un experimento muy similar al descrito, pero en el que se usaba agua en lugar de aceite. Las gotas se evaporaban demasiado rápido, haciendo muy difíciles y poco precisas las mediciones. De hecho, Millikan y Begeman lo habían reproducido en su laboratorio. En la conversación se sugirió que quizás otra sustancia podría mejorar las condiciones experimentales. «Allí está tu tesis», dijo Millikan a su estudiante. «Anda y prueba con gotas de mercurio o de aceite, que no se evaporarán».

Esa misma tarde Fletcher fue a una farmacia, compró un atomizador y una botella de aceite de reloj e hizo un primer montaje del experimento. Al mirar por el microscopio quedó impactado: «Vi un paisaje maravilloso. El campo de visión estaba cubierto de estrellitas, que tenían todos los colores del arco iris. Las más grandes caían pronto al fondo del recipiente, mientras las más pequeñas se mantenían suspendidas en el aire por casi un minuto, ejecutando una danza fascinante. [...] las pequeñas gotas estaban siendo empujadas primero en una dirección y luego en otra por las moléculas de aire que las rodeaban». El aceite parecía ser la sustancia que buscaban.

Cuestiones de autoría

Cuando Robert Millikan vio el montaje de Fletcher quedó impresionado. Siguieron trabajando durante dos años, codo a codo, mejorando el experimento. Publicaron cinco artículos entre 1909 y 1910. Le dijo a su estudiante que para su tesis debía tener artículos como único autor, por lo que determinaron que dos serían firmados por él, dos por ambos y sólo uno por Millikan. Claro que se trataba del primero y, por lo tanto, el más importante. Esto ha propiciado un debate sobre el rol de Harvey Fletcher en el descubrimiento. Muchos creen que debió haber recibido el premio Nobel junto a su director de tesis.

Fletcher siempre se mantuvo al margen de la discusión. A pesar de que en 1911, tras su graduación, dejó la Universidad de Chicago, mantuvo una larga amistad con Millikan, que perduró hasta su muerte. Es más que posible que hubiese merecido el premio. Pero también parece claro que fue Robert Millikan el gran arquitecto del experimento. Trabajó muchos años sobre la idea y, ya sin la ayuda de Fletcher, fue el autor único del artículo que vio la luz hace poco más de un siglo, en el que determinó con espléndida precisión el valor de la carga eléctrica del electrón.

Con el tiempo Fletcher se transformaría en director de investigación para las ciencias físicas de *Bell Telephone Laboratories*. Allí fueron particularmente famosas las investigaciones que se hicieron bajo su liderazgo en las áreas de percepción

del sonido, grabación electrónica y sonido estereofónico. De hecho, Fletcher es más conocido hoy como el padre del sonido estéreo que por sus contribuciones en el experimento de Millikan. Célebre fue la presentación que hizo en abril de 1940 en el Carnegie Hall, junto al director de orquesta Leopold Stokowski, en donde se presentó una grabación estéreo que dejó deslumbrada a una multitudinaria audiencia, que escuchaba sonidos vivos y realistas, provenientes de una orquesta inexistente.

Una carga de misterio

Uno de los grandes misterios de la Naturaleza sigue siendo por qué la carga eléctrica se manifiesta siempre en múltiplos enteros de la que corresponde a un electrón. El protón, por ejemplo, tiene exactamente la misma carga, pero con signo opuesto. Mucha de la materia que observamos en el firmamento, en remotos cúmulos de galaxias, está tan distante que jamás pudo haber estado en contacto entre sí. ¿Qué clase de conspiración universal está detrás de este reparto de la carga eléctrica en paquetes que no admiten ser fraccionados?

Al recibir el premio Nobel de física, Richard Feynman contó una anécdota al respecto. Su director de tesis en Princeton, John Archibald Wheeler, lo había llamado por teléfono muy excitado diciéndole: «Feynman, ya sé porque todos los electrones tienen la misma masa y carga». «¿Por qué?», contestó él, a lo que Wheeler replicó, «¡Porque son todos el mismo electrón!». Borges escribiría

tiempo después una idea parecida «[...] y los tigres que fueron y serán [...] el tigre arquetipo, ya que el individuo, en su caso, es toda la especie». Wheeler imaginó a un único electrón que, yendo y viniendo hacia atrás y adelante en el tiempo, sería capaz de pasar por el presente muchas veces en distintos lugares. Cada vez que lo hiciera hacia el futuro, veríamos un electrón, mientras que al hacerlo hacia el pasado, observaríamos un *antielectrón* o positrón, de igual masa pero de carga eléctrica opuesta. Con fina perspicacia, Feynman le contestó que esto no podía ser así, pues había en el Universo muchos más electrones que positrones.

Si bien la idea no prosperó de inmediato, como lo reconoció el propio Feynman en su discurso ante la academia sueca, fue el germen de su audaz propuesta de que las antipartículas pudieran interpretarse como partículas viajando hacia el pasado, proposición que está en el corazón de su teoría cuántica de las interacciones electromagnéticas por la que estaba siendo galardonado. El misterio de la atomización de la carga eléctrica, como vemos, ha obsesionado a las mentes más brillantes durante el último siglo. Hoy se conocen muchas otras partículas que llevan carga eléctrica. Todas siguen satisfaciendo este mágico principio, con la única excepción de los quarks, partículas de las que están hechos, por ejemplo, los protones y neutrones. Estos tienen cargas que son múltiplos de la tercera parte de la del electrón. Sin embargo, los

quarks no pueden existir en soledad: siempre se presentan en grupos de dos o tres, formando partículas compuestas cuya carga eléctrica es compatible con la observación de Millikan.

Monopolos magnéticos y carga eléctrica

En 1931, Paul Dirac, ese jovencito que iniciara su doctorado al tiempo que Millikan recibía el premio Nobel, propuso una idea desconcertante que podía explicar la atomización de la carga eléctrica. Dirac era un obsesivo de la estética formal de las teorías físicas. A partir de ella había predicho la existencia de la antimateria poco tiempo antes. Y la simetría es belleza. Por ello le producía una inquietud perturbadora la presencia de una sutil asimetría en la teoría del electromagnetismo formulada por James Clerk Maxwell a fines del siglo XIX. Hay dos ingredientes en esta teoría: los campos eléctrico y magnético, que impregnan el espacio, y la materia que les da origen e interactúa con ellos. A pesar de que los campos entran en las ecuaciones de forma simétrica —en otras palabras, son esencialmente intercambiables—, la materia que los genera presenta una asimetría estrepitosa: no existen cargas magnéticas. Esto es algo bien sabido desde los tiempos de la antigua Grecia: los imanes siempre tienen dos polos. Es estrictamente imposible fabricar un imán que sólo tenga un polo norte.

Para el refinado paladar de Paul Dirac resultaba una afrenta estética intolerable que la Naturaleza tuviera semejante mal gusto. En uno de los artículos teóricos más geniales de la historia de la ciencia, Dirac decidió dar la espalda a los hechos experimentales y postular la existencia conjetural de cargas magnéticas, comúnmente denominadas monopolos, e indagar sobre sus posibles consecuencias. Sabía que la presencia de monopolos magnéticos era incompatible con la propia definición de los campos eléctrico y magnético en la formulación de Maxwell. No obstante, siguiendo un hilo de razonamiento a cuyo ingenio y originalidad, deslumbrantes, no es posible hacerles justicia en estas líneas, Paul Dirac probó que las leyes de la física cuántica son suficientes para demostrar que la existencia de un monopolo magnético garantizaría que todas las cargas eléctricas del Universo, no importa cuán remoto sea el rincón en el que se encuentren, deban ser múltiplos enteros de una unidad de carga fundamental.

No deja de ser irónico que cuando Paul Dirac, apenas un año después, entró en el Olimpo de la ciencia al confirmarse experimentalmente la existencia de la antimateria que él predijo, como producto de las observaciones realizadas por un estudiante de doctorado de Robert Millikan, éste se erigiera, casi en solitario, en uno de sus críticos más contumaces. A pesar de su carácter huraño, Dirac supo cosechar una relación antagónica con Millikan. En abril de 1935 ambos acudieron a la embajada de la Unión Soviética en Washington para abogar por la liberación de Piotr Kapitsa,

quien trabajaba en Cambridge y había sido detenido al ir a visitar a sus padres a Rusia unos meses atrás. Dirac había escrito poco antes con Kapitsa un trabajo de gran relevancia para comprender la naturaleza cuántica de la interacción entre los electrones y la luz. Por ello asumió frente a su esposa Anna, la difícil misión de convencer a las autoridades soviéticas de que lo dejaran regresar a Inglaterra. Fue Dirac quien eligió a Millikan para que lo acompañara, «él es conocido por su oposición a los soviéticos pero eso será equilibrado por mi conocida posición más bien favorable». La carta que entregaron al embajador, firmada por el propio Einstein, no tuvo mayor efecto.

Felix Ehrenhaft, el vienés de los *sub-electrones* al que Millikan había refutado (aunque él no diera el brazo a torcer durante varios años), un personaje irreverente e iconoclasta, se convirtió en su crítico consuetudinario. Quizás eso le llevó a asegurar en los '40 que había observado monopolos magnéticos y acosó a Dirac enviándole cartas con noticias de su erróneo descubrimiento, buscando una aprobación que jamás llegó. No hay evidencias hasta la fecha de la existencia de al menos un monopolo magnético, aquél que por sí solo respondería al gran misterio secular que Robert Millikan nos dejó en herencia.

NACIDO EL 4 DE JULIO

El miércoles 4 de julio de 2012 era el día que todos los físicos de partículas del mundo esperaban ansiosos desde hacía décadas. El CERN anunciaría novedades sobre el estado en el que se encontraba la búsqueda del bosón de Higgs, una de las más persistentes y audaces aventuras científicas jamás emprendidas por el ser humano, inimaginable para el propio Peter Higgs, quien en 1964 le escribía a un colega, «este verano descubrí algo completamente inútil». Ignoraba que dos publicaciones suyas, menos de tres páginas repletas de ecuaciones, junto al trabajo escrito independientemente por Robert Brout y François Englert, desencadenarían la inversión económica en un proyecto científico más importante de todos los tiempos.

Los rumores de su posible hallazgo comenzaban a multiplicarse en todos los pasillos de institutos y universidades. El gran colisionador de hadrones (LHC), la máquina más grande y sofisticada fabricada por nuestra especie, tenía por objetivo

principal desenterrar este eslabón perdido del universo subatómico. Con orden de caza y captura desde medio siglo antes, el bosón de Higgs juega un papel crucial en la teoría de las partículas elementales. ¡Y vaya si la espera fue bien recompensada! Los datos combinados de dos de los experimentos del CERN, Atlas y CMS, indicaron con meridiana claridad que se había detectado una nueva partícula y que con toda probabilidad se trataba del anhelado bosón.

¿Por qué es necesario un artefacto de decenas de kilómetros de largo para poder ver a una partícula subatómica? ¿Por qué el bosón de Higgs era tan difícil de observar? ¿En dónde radica su importancia en el entramado de la física fundamental?

La simetría gauge

El trepidante progreso de la física de las partículas elementales tuvo lugar de la mano de un nuevo y audaz paradigma: las leyes fundamentales de la Naturaleza son el resultado de una adecuada identificación de sus simetrías más íntimas. Por ejemplo, la Teoría de la Relatividad Especial emerge de manera unívoca de una noción muy sencilla: las leyes de la física deben ser las mismas para distintos observadores que se acercan o alejan entre sí a velocidad constante, denominados observadores inerciales. Y esto es precisamente lo que entendemos por simetría; el hecho de que una observación no sea modificada al cambiar el punto de vista de

nuestra mirada. Todos los observadores inerciales son igualmente buenos para hacer física, y de ello se desprende la Teoría de la Relatividad Especial y su célebre equivalencia entre la masa y la energía.

El electromagnetismo puede verse como el resultado de otra simetría, mucho más sutil pero bastante sencilla. Para describir a una partícula subatómica con carga eléctrica son ineludibles los números complejos. Estos no son otra cosa que pares de números. Como si fueran las coordenadas de un punto en un plano. Un plano abstracto, imaginario, que nada tiene que ver con el espacio en el que se mueve la partícula, sino con los ingredientes últimos de los que está hecha la materia. Imaginemos que se pidiera a dos lectores que dibujen un par de ejes cartesianos en dicho plano. Muy probablemente los representarían en direcciones distintas. Y ninguna elección sería mejor que la otra. De la democrática posibilidad de elegir la dirección de los ejes en ese plano abstracto, a la que se conoce como simetría *gauge*, es posible deducir las ecuaciones que Maxwell escribió a mediados del siglo XIX y que dictan el comportamiento de todos los fenómenos eléctricos y magnéticos.

Es difícil hacer justicia en un texto breve y desprovisto de matemáticas a una construcción tan elegante y profunda. La simetría *gauge* es la imposición de una innecesaria redundancia en la teoría, que resulta crucialmente operativa a nivel matemático para poder llevar sus cálculos y empujar

sus conclusiones insospechadamente más lejos. Permítasenos subrayar, de manera categórica, que la simetría *gauge* es la piedra basal de la sofisticada arquitectura del Modelo Estándar de las partículas elementales.

El problema está en la masa

Las fuerzas eléctricas y magnéticas son mediadas por un *campo electromagnético* que llena el espacio. Éste funciona como un brazo invisible que permite que cuerpos cargados puedan atraerse o repelerse, aunque también puede vibrar generando ondas electromagnéticas: la luz. A nivel microscópico estas ondas pueden describirse en términos de unidades elementales llamadas *fotones*; los cuantos de luz. La masa de estos fotones es cero. Exactamente cero. De hecho, una de las características más peculiares de la simetría *gauge* es que resulta incompatible con la masa. Si los fotones tuvieran masa, por pequeña que ella fuera, la simetría *gauge* dejaría de existir. La redundancia de la que se vale esta simetría sólo tiene lugar en ausencia de masa. Así, podríamos invertir las tornas y pensar que es la simetría *gauge* la que nos permite *predecir* que las partículas de luz no tienen masa, sin necesidad de acudir al laboratorio para comprobarlo.

Más allá del electromagnetismo, la simetría *gauge* es un ingrediente fundamental en la descripción de todas las interacciones existentes. Desde

la fuerza nuclear fuerte, que mantiene unidos a protones y neutrones en el núcleo atómico, hasta la interacción gravitatoria, que nos mantiene aferrados a la Tierra a la vez que ésta gira alrededor del Sol. Todas son descritas por campos similares al electromagnético, que permean el espacio y que también pueden vibrar dando origen a partículas análogas al fotón. Es así como la fuerza nuclear fuerte da origen a partículas llamadas *gluones* y la fuerza gravitacional a los *gravitones* (que, por cierto, no han sido observados aún: la naturaleza microscópica de la fuerza gravitacional sigue siendo uno de los grandes misterios de la física). Estas partículas, al igual que los fotones, pueden interpretarse como mediadoras de sus respectivas interacciones y están irremediablemente desprovistas de masa.

Existe una cuarta interacción en la Naturaleza llamada fuerza nuclear débil, responsable de la desintegración radiactiva de los núcleos atómicos y, en definitiva, de la persistente combustión de las estrellas. Sus partículas asociadas reciben nombres menos glamorosos: W y Z. El físico neoyorquino Sheldon Lee Glashow fue quien modeló en 1961 esta interacción y lo hizo ni más ni menos que unificando a la fuerza débil con el electromagnetismo de Maxwell dentro de lo que denominó *Teoría Electrodébil*, uno de los hallazgos más importantes de la ciencia del siglo XX. Un aspecto crucial de esta teoría, sin embargo, a efectos de que el alcance de la fuerza débil no se extendiera más allá

del núcleo atómico, era que las partículas W y Z, indefectiblemente, debían tener masa, tal como fue confirmado experimentalmente por el propio CERN en 1983.

La teoría de Glashow, sin embargo, condicionada por la inclusión del electromagnetismo, hacía uso de la simetría *gauge* obligando, por lo tanto, a las partículas W y Z a no tener masa. Salvo por esta importante inconsistencia, que en apariencia representaba un escollo infranqueable, la teoría parecía funcionar bien. Estaba claro que había un ingrediente que faltaba. De algún modo, la simetría *gauge* debía romperse en la Teoría Electrodébil de manera suficientemente delicada como para poder explicar la masa de las partículas W y Z, al tiempo que la incontrovertible existencia de fotones sin masa no fuera afectada. Así nació lo que hoy se llama el campo de Higgs que, al igual que los otros, puede *vibrar* y dar origen a partículas: los bosones de Higgs.

Bosones y fermiones

Todas las partículas elementales parecen girar sobre sí mismas como minúsculos trompos. La magnitud de su giro, el espín, no es arbitraria. Debe ser, necesaria y exactamente, un número entero (0, 1, 2,...) o semi-entero (1/2, 3/2, ...) de veces cierta constante universal que se conoce como la constante de Planck. El universo material resulta dividido, así, en dos grandes reinos: los *bosones*,

de espín entero, y los *fermiones*, de espín semi-entero. Ejemplos de bosones son el fotón, los gluones y los mediadores de la fuerza débil: W y Z. Fermiones son el electrón, los neutrinos y los quarks que conforman tanto a neutrones como a protones en el núcleo atómico. El reino de los bosones admite, en principio, la posibilidad de contar con un ejemplar de espín nulo. Esto es, una partícula que no tiene giro intrínseco. Hasta que el CERN realizó el tan esperado anuncio, jamás había sido observada una criatura semejante. El bosón de Higgs es el primer (y quizás único) miembro de esa estirpe.

Los bosones son partículas que pueden amontonarse en cantidades enormes para dar lugar a un campo distribuido homogéneamente en el espacio. Esta es la clave para entender lo que se conoce como el *mecanismo BEH* (de Brout, Englert y Higgs). El campo en cuestión funciona como una suerte de melaza cósmica que hace que algunas de las partículas que se desplazan a través de él encuentren cierta resistencia a su movimiento que se refleja en un aumento de su inercia. Estrictamente, no se trata de un fenómeno de fricción —en el que el medio se opone al movimiento de manera proporcional a la velocidad del cuerpo— como en el caso de la melaza. En este sentido, la analogía es incorrecta. En el mecanismo BEH la oposición es a la variación en el estado del movimiento, al cambio de velocidad; precisamente, la característica definitoria del concepto de masa.

El campo de Higgs entorpece el movimiento de las partículas sin rozarlas, como una multitud que puede dificultarnos el caminar aún sin tocarnos. Y así como Shakira, previsiblemente, al verse rodeada por una nube de personas que querrán hablar con ella tendría mayores dificultades que nosotros para atravesar la muchedumbre, así como a ella le costará más cambiar su estado de movimiento debido a la nube de admiradores y curiosos que debe arrastrar tras de sí, algunas partículas interactúan más que otras con el campo de Higgs y, como consecuencia, tienen mayor masa. Otras partículas, de hecho, como si se tratara de perfectos desconocidos, pasan desapercibidas sin que el gentío represente ningún obstáculo. Ésas son las que no tienen masa.

Una criatura con varios padres

Tuvieron que transcurrir cincuenta años desde su concepción para que el bosón de Higgs recién empezara a asomar la cabeza entre las piernas abiertas de la madre Naturaleza. Para colmo, varios son los padres que se disputan a la criatura nacida de un parto tan lento como ansiosamente esperado. La mayor parte de ellos, octogenarios. El capricho del destino, junto a la rotunda sonoridad de un apellido monosilábico, se han conjurado para que la partícula haya sido universalmente denominada bosón de Higgs, colocando en un sitial privilegiado a Peter Higgs en la lucha por la

paternidad. La historia dirá, sin embargo, que el primero en concebir la idea de que es posible dar masa al bosón mediador de una simetría *gauge*, a partir de la ruptura espontánea de ésta, fue Philip Anderson, en un artículo escrito en noviembre de 1962, quince años antes de recibir el premio Nobel de física por otras investigaciones. Pero el rango de validez de su trabajo no incluía a teorías como aquellas que se utilizan para describir a las partículas elementales y sus ideas no parecían fácilmente generalizables.

Dos años más tarde llegaron los trabajos de Robert Brout (fallecido en 2011) y François Englert, las dos publicaciones de Peter Higgs, y un par de meses después el artículo del terceto integrado por Gerald Guralnik (recientemente fallecido), Carl Richard Hagen y Thomas Kibble. Todos ellos, sin embargo, se afanaban por aplicar los resultados de sus investigaciones a la fuerza nuclear fuerte. Hubo que esperar al legendario artículo *Un modelo de leptones* de Steven Weinberg, publicado en 1967, para que el *mecanismo BEH* fuera adecuadamente aplicado en el contexto de la Teoría Electrodébil. Este mecanismo, una de cuyas consecuencias es la existencia del famoso bosón, es una construcción teórica sencilla y elegante que explica por qué las fuerzas nucleares sólo son perceptibles en el interior del núcleo atómico, a pesar de ser de la misma naturaleza que la fuerza electromagnética, cuyo alcance es infinito.

Frente al exceso de científicos que podían reclamar con distinto grado de legitimidad la paternidad de la criatura, existió mucha incertidumbre sobre quiénes habrían de compartir el premio Nobel de física que, nadie lo dudaba, debía seguir al espectacular anuncio del CERN. Las estrictas reglas de la Academia Sueca sólo permiten que tres científicos lo compartan. Todas las quinielas incluían, con justicia, a Englert y Higgs. El gran interrogante estaba en la posibilidad de incluir a un tercer galardonado. El 4 de julio que ya es parte de la historia de la física de partículas elementales, Englert lamentó emocionado que su colaborador y amigo Robert Brout no hubiera vivido lo suficiente para estar presente en el parto. Sin duda habría completado la terna. En su ausencia, muchos pensaban que se rompería una añeja tradición según la cual el premio Nobel no se entrega a instituciones sino a personas, y el CERN entraría en liza. Todo parece indicar que los académicos tuvieron sus vacilaciones, ya que el anuncio del Nobel se demoró casi una hora más de lo previsto, pero con buen criterio decidieron dejar vacante el tercer galardón, recordando con ese gesto que su verdadero merecedor no era otro que el malogrado Brout.

No deja de ser curioso que François Englert y Peter Higgs se hayan visto las caras por primera vez en el auditorio del CERN el día del anuncio. Nunca antes se habían encontrado este par de hombres, tan caracterizadamente disímiles como dos personajes de las *Vidas paralelas* de Plutarco. Higgs es humilde y reservado. Bonachón. Un hombre solitario y austero. Englert, en cambio, es extrovertido. Festivo y jovial. Risueño. Funcionan como perfectos arquetipos de las culturas anglosajona y latina. Higgs abandonó la investigación científica cuando consideró, poco después de las dos publicaciones que le convirtieron en una celebridad, que no tenía nada más para decir. Englert, en cambio, ha seguido en actividad hasta estos días, lidiando con lozano entusiasmo con las nuevas ideas de la física teórica (Teoría de Cuerdas, Supergravedad), temas en los que realizó contribuciones de relieve.

La partícula elusiva y las redes de la historia

¿Por qué fue tan difícil encontrar al bosón de Higgs? Las razones son varias. La teoría no predice con exactitud su masa, lo que hizo mucho más difícil su búsqueda. De hecho, las investigaciones de las últimas décadas se han orientado a descartar su existencia para un amplio espectro de valores de la masa. Particularmente difícil de escrutar es la región en la que finalmente se lo encontró. Las mediciones nos enseñaron que su peso equivale, por sí solo, a aproximadamente ocho átomos de oxígeno o más de una decena de átomos de carbono. Es decir, estamos hablando de un peso pesado del mundo subatómico.

Al crearlo en colisiones de protones, la propia teoría predice que se trata de una partícula de vida

muy fugaz. Su enorme masa le lleva a recorrer una distancia ínfima a lo largo de su corta existencia, de modo que no deja una traza apreciable en las imágenes de las colisiones. El bosón de Higgs transmuta en otras partículas de menor masa, mucho antes de que exista alguna posibilidad de observarlo directamente. Interactúa con todas las partículas a las que da masa, de modo que el resultado de su decaimiento es poco distintivo y difícil de diferenciar de la multitud de diversas partículas producidas cuando dos protones muy energéticos colisionan frontalmente. Para colmo, aquellos decaimientos que son más característicos resultan menos frecuentes, de modo que es necesario «ver» centenares de bosones de Higgs para ser finalmente capaz de identificar alguno.

El bosón de Higgs se presenta como una persona oculta en una multitud, que al cabo de un instante adquiere el aspecto de uno o más de aquellos que lo rodean. ¿Cómo distinguir, al ver a una persona ordinaria, si se trata de ella misma o del bosón de Higgs transmutado? No es fácil. Debemos deducir, a través de complejos cálculos teóricos, la distribución de personas ordinarias, e inferir a través de pequeñísimas variaciones la presencia de personas que si no existiera el bosón de Higgs no deberían estar allí. El trabajo estadístico es tremendamente complejo, de allí la larga espera. Se necesitaron billones de colisiones para conseguir que los datos valiosos, aquellos correspondientes a eventos en

los que el bosón de Higgs pudiera estar implicado, se distinguieran del complejo patrón de millones de sucesos aleatorios. Se trataba de buscar una aguja en un enorme pajar. La paciencia, el rigor sostenido en el tiempo y la colaboración mancomunada de miles de científicos que trabajan en decenas de países, dieron finalmente sus frutos.

El miércoles 4 de julio de 2012, como cualquier otro día de cualquier otro año, se sucedieron las noticias. En Galicia fue recuperado el *Códice Calixtino*, manuscrito del siglo XII que custodia los secretos del Camino de Santiago. En América, el *Corinthians* se coronó campeón de la Copa Libertadores por primera vez en su historia. Los amantes de la música recordábamos con melancolía a Astor Piazolla en el vigésimo aniversario de su fallecimiento. Y aquellos que también disfrutamos de la elegante belleza de la ciencia, esa sofisticada forma de acceder al conocimiento de la que nos hemos dotado los seres humanos, también recordábamos a la colosal Marie Curie, fallecida ese mismo día de 1934. Dentro de mil años, sin embargo, esa fecha será recordada exclusivamente como aquella en la que el bosón de Higgs, el fugitivo maldito de las leyes de la Naturaleza, cayó ¡al fin! en las perseverantes redes que supo tejer una curiosa especie bípeda de un minúsculo planeta azul situado en los márgenes de la Vía Láctea.

LA PARTÍCULA QUE NUNCA ESTUVO ALLÍ

Dicen que vivió en Argentina en los años '50. Varios testigos afirman haberlo visto en el Hotel Continental garabateando fórmulas en una servilleta. También se lo habría visto en Venezuela, donde incluso se rumorea que habría sido fotografiado. Otros aseguran que fue asesinado en la Italia de Mussolini por sus conocimientos en materia nuclear. O que huyó para convertirse en monje o mendigo. El misterio de la desaparición del físico italiano Ettore Majorana es uno de los acontecimientos más extraños en la historia de la ciencia moderna. La crónica oficial, sin embargo, dice que se suicidó el 27 de marzo de 1938. Se habría arrojado al mar Tirreno durante un viaje en barco entre Palermo y Nápoles. El cuerpo nunca fue encontrado.

El espíritu de Majorana está de regreso en estos días debido a los resultados de un experimento realizado en la Universidad de Delft. En él se habría recreado, tres cuartos de siglo después de

haber sido predicha, una partícula conocida como *fermión de Majorana*. Esta hipotética partícula, tan elusiva como su creador, jamás se ha visto en la Naturaleza. O eso se cree. Algunos especulan con la posibilidad de que el neutrino sea un fermión de Majorana, afirmación que no ha podido ser probada y es motivo de intensos debates. También se cree que la materia oscura, argamasa invisible que sostiene la arquitectura coreográfica de las cien mil millones de galaxias que pueblan el cosmos, podría estar constituida por estas misteriosas partículas. Aún está por verse. Ninguna de las partículas elementales conocidas, de momento, ha dado cuerpo al fermión de Majorana.

Partículas y cuasi-partículas

Lo que hizo el equipo de Leo Kouwenhoven en Delft no fue encontrar un fermión de Majorana, sino más bien reconstruirlo, imitando sus propiedades. Lo produjeron como una *cuasi-partícula*. Podemos recurrir a una analogía para entenderlo. Imaginemos un estadio de fútbol cuyas tribunas están repletas. En un sector del estadio los espectadores se levantan de sus asientos de manera coordinada al tiempo que alzan sus brazos. Los que están a su derecha, al verlos, imitan esta acción con una ligera demora. Y así sucesivamente. Se produce lo que llamamos *una ola*.

Si bien ningún espectador puede moverse de su sitio, desde el césped se aprecia la existencia de un

ente, colectivo, que se desplaza con una velocidad uniforme alrededor del estadio. Y lo hace con propiedades propias muy características, relacionadas vagamente con los seres humanos que la producen, pero no demasiado. Una ola producida por espectadores muy altos o muy bajos, muy gordos o muy flacos, es esencialmente idéntica. La ola es un estado posible del complejo sistema conformado por miles de hinchas. Uno que, sin embargo, adopta un aspecto bastante simple. Como una suave onda que recorre las graderías con un tamaño y forma determinados. De un modo parecido tienen lugar las cuasi-partículas en un sistema complejo de muchas partículas.

Ya hemos mencionado que las partículas elementales tienen una curiosa característica: parecen girar sobre sí mismas como si fueran minúsculos trompos. Y que la magnitud de ese giro, el espín, debe ser, necesaria y exactamente, un número entero (*bosones*) o semi-entero (*fermiones*) de veces la *constante de Planck*. No hay otro giro permitido por las rígidas leyes del mundo subatómico en un Universo con tres dimensiones espaciales como el nuestro. Ni siquiera para las cuasi-partículas.

El fermión misántropo y la materia impenetrable

Los fermiones fueron bautizados en honor a otro de los grandes físicos italianos del siglo XX, Enrico Fermi, uno de los pocos científicos de la historia que puede presumir de haber alcanzado

logros experimentales y teóricos igualmente importantes. Fermi fue el creador del primer reactor nuclear y, al mismo tiempo, el autor de la primera teoría sobre el decaimiento radiactivo y los neutrinos. Fue, además, uno de los grandes maestros de Majorana, quien ingresó muy joven en su grupo de investigadores de los años '30 conocido como *los chicos de la calle Panisperna*. Sobre Majorana, Fermi diría: «Hay varias categorías de científicos en el mundo. Aquellos de segundo o tercer rango, quienes hacen lo que pueden sin llegar nunca demasiado lejos. Luego están los de primer rango. Aquellos que hacen descubrimientos importantes, fundamentales para el progreso científico. Pero además están los genios, como Galileo o Newton. Majorana fue uno de ellos».

La característica fundamental de los fermiones está dictada por lo que se conoce como el principio de exclusión de Pauli. No puede haber dos fermiones en el mismo estado. Si imaginamos el conjunto de todos los estados físicos posibles como las butacas de un estadio de fútbol, en cuanto un fermión ocupa la suya ningún otro puede compartirla. Así se comportan los electrones en un átomo, y es ésta la razón última por la cual la materia es impenetrable. Cualquier cambio en la configuración electrónica de un átomo es inmediatamente observable y modifica sus propiedades radicalmente. Una buena parte de la química y de la biología molecular se asientan en este arisco comportamiento de

los electrones. Los bosones, en cambio, no tienen problema alguno en compartir butaca, en amontonarse. Es por eso que los fotones se acumulan en cantidades enormes para dar lugar a la luz que ilumina estas líneas. Los fotones pueden sumarse a la multitud o ausentarse de ella sin entrañar una diferencia cualitativa importante.

La descripción cuántica y relativista de los fermiones viene dada, como mencionamos anteriormente, por la ecuación de Dirac, una de cuyas consecuencias es la existencia de la antimateria. Cada partícula fermiónica posee su *némesis*, una partícula idéntica en todo pero de carga eléctrica opuesta. Si ambas se encuentran, se aniquilan mutuamente produciendo una gran cantidad de energía en forma de luz. La ecuación de Dirac fue elaborada con el electrón en mente. El descubrimiento del positrón, en 1932, puso a la antimateria en el centro de la escena científica. En ese contexto, Ettore Majorana se planteó una pregunta que puede llevarse a términos muy simples: ¿qué pasa si un fermión no tiene carga eléctrica? ¿Tiene una antipartícula o, en algún sentido, es él mismo su propia antipartícula? La descripción matemáticamente rigurosa de este posible fermión neutro fue realizada por el propio Majorana en 1937, a la edad de 30 años. Pero desde entonces, como si se tratara de una metáfora de su incierto destino, jamás se pudo certificar la existencia o el paradero de estas partículas.

Por esos años Majorana se había transformado en un ermitaño. Nadie lo veía nunca en el Instituto de Física en Roma. Antes de abandonar Italia y emigrar a los Estados Unidos, Fermi lo ayudó a conseguir un puesto de profesor titular en la Universidad de Nápoles. Fue Antonio Carrelli, el director del Departamento de Física de esa universidad, quien recibió la carta en la que Majorana anunciaba su suicidio. La carta llegó acompañada por un telegrama que pedía, a su vez, que no se la tomase en cuenta. Antes de subirse al barco en el que se le vio por última vez, sacó todos sus ahorros del banco, hecho que para su familia es prueba segura de que Ettore no se suicidó, sino que decidió desaparecer.

Fermiones de Majorana en una dimensión

En muchas ocasiones resulta interesante simplificar los problemas físicos extrapolándolos a situaciones en las que, en lugar de disponer de tres dimensiones espaciales para movernos, contamos con menos. Así, por ejemplo, podemos estudiar las propiedades del fermión de Majorana utilizando un sistema unidimensional como el que conforma, de manera aproximada, una extensa cadena de átomos. Éstas estructuras lineales se pueden producir en la actualidad mediante sofisticadas técnicas de la disciplina llamada *nanotecnología*. Si bien las partículas elementales no dejan de ser ellas mismas, su comportamiento puede cambiar

cuando son forzadas a vivir en un número menor de dimensiones. Más interesante aún, la estrechez del nuevo hogar puede hacer que éstas presenten comportamientos colectivos novedosos.

Volvamos a la imagen de los fermiones y sus posibles estados como un conjunto de espectadores que ocupan butacas en un estadio de fútbol repleto. Antes de acomodarse, cada persona que ingresó en el estadio podía moverse en tres dimensiones espaciales (ayudándose, por ejemplo, de un ascensor para desplazarse en la dirección vertical). Pero al llegar a las tribunas ve restringida su libertad a movimientos en dos dimensiones, sobre la superficie de las tribunas. Busca su fila y número de asiento, ocupa su posición y, cuando el estadio está repleto, no parece quedarle margen para ningún comportamiento interesante, condenado a permanecer inmóvil. Sin embargo, esto no es así, como vimos al describir el movimiento colectivo que da origen a la ola.

Si la tribuna es circular y los espectadores han sido instruidos para imitar lo que hacen quienes están sentados a su izquierda, la ola, una vez iniciada, resultará eterna. Si la tribuna es recta o hay un sector del campo, detrás de una portería, en el que no hay tribuna, la ola morirá al llegar a los espectadores que están sentados al lado de la pared que delimita este sector. Así, vemos que el comportamiento de la ola depende crucialmente de propiedades que involucran a la totalidad de

la tribuna (si ésta es abierta o cerrada, si tiene bordes o no, si presenta bifurcaciones...), a pesar de que su gestación se apoya en el comportamiento de espectadores que sólo prestan atención a los que tienen inmediatamente al lado, y que no tienen por qué saber de las características globales de la tribuna.

Imaginemos ahora una tribuna muy larga de sólo dos filas, una repleta y la otra vacía, encima de la anterior. La megafonía propone una suerte de coreografía: cada espectador debe dejar su sitio y pasar a la fila de arriba, pero sentándose en el asiento que se encuentra un lugar a la derecha. Si la tribuna es circular, se produce un simpático movimiento sin consecuencias relevantes. Pero si la tribuna tiene bordes, el movimiento produce dos situaciones anómalas. El espectador que se encontraba más a la derecha, no tiene butaca a la que ir. Y la butaca más a la izquierda de la segunda fila no tiene espectador que se siente en ella. Para todos los demás, espectadores y butacas, nada raro habrá ocurrido.

La teoría indica que, si en lugar de espectadores tenemos fermiones y en lugar de butacas una cadena atómica con algunas características especiales, el espectador sin butaca y la butaca sin espectador habrán de comportarse como un fermión de Majorana. Así, éste aparece en los extremos de la cadena atómica, como resultado del comportamiento colectivo de todos sus átomos. Lo que se

obtiene, entonces, no es un fermión de Majorana fundamental. Es una suerte de sucedáneo, una *cuasi-partícula* que puede existir en los extremos de un material cuidadosamente diseñado, como producto de sus propiedades globales. Las potenciales aplicaciones de estos sistemas en el prometedor campo de la computación cuántica exceden el alcance de estas líneas.

Esta coreografía de electrones en una cadena atómica es lo mejor que podemos hacer, de momento, para traer al laboratorio al menos la sombra de estas singulares partículas predichas por Majorana, uno de los más brillantes y extraños hombres del siglo XX que se fue muy temprano sin decirnos a dónde. Por no saber, no sabemos ni siquiera dónde están sus restos. Quizás en algún cementerio sudamericano. O en las profundas aguas del Tirreno. En estos días, eso si, dicen que le han visto en Holanda.

NADA FASCINANTE

La hoja en blanco se presenta inquisitiva. El editor nos apremia y no sabemos qué contar. No hay historias, no hay ideas. En verano no hay noticias. Esta repentina retirada de la creatividad nos enfrenta, en busca de temas, a un espacio oscuro y vacío. La nada nos abruma.

Pero desde la enquistada memoria de la última década del siglo pasado, Jerry Seinfeld y George Constanza nos lanzan un oportuno salvavidas. Recordamos una ocasión en la que los vimos en un bus, en Nueva York, hablando sobre los desencuentros de George con cierta mujer. Su dificultad para establecer con ella algo parecido a un diálogo.

George: No hay de qué hablar...

Jerry: ¡Ah!, ¿Pero hay, acaso, en general, algo de qué hablar?

George: Bueno... al menos tú y yo hablamos de cómo no hay nada de qué hablar...

Jerry: ¿Por qué no hablas con ella sobre cómo no hay nada de qué hablar?

George: ¡Ella ya sabe que no hay nada de qué hablar!

Jerry: Ya... Pero al menos estarán hablando.

Y, ¡claro!, esta *sitcom* se vanagloriaba de tratarse precisamente de eso, de nada en especial. De entrañables personajes viviendo su vida inespecífica. De nada. Tal como en el mundo de la comedia, por extraño que parezca, en la ciencia la nada también es fascinante. No debemos mirarla por encima del hombro con desdén. Quizás sea la nada, después de todo, lo único que realmente exista allá afuera.

La nada: el reino de la simetría

Desde que Gottfried Wilhelm Leibniz la formuló, hace más de tres siglos, muchos coinciden en afirmar que la pregunta más profunda de la ciencia es «¿Por qué hay algo en lugar de nada?». Sin embargo, el interrogante no estará bien formulado hasta que no sepamos qué queremos decir exactamente con *nada*. Y con *algo*.

Hay al menos dos versiones de la nada. La *nada fría*, a la que nos enfrenta la voz acuciante del editor. La aludida hoja en blanco. La versión suprema de la ausencia y el orden. Una habitación lóbrega y fría. Vacía e infinita. Ésta es quizás la noción más inmediata que se nos viene a la cabeza. La nada fría es análoga al televisor apagado. Negro y silencioso.

Pero está también la *nada caliente*. La nada bíblica del *Génesis* que imaginaron aquellos hombres que vivían en los márgenes del río Éufrates. Una nada amorfa, desordenada, caótica. La apología de la presencia y el desorden. La imagen de un televisor sintonizado en un canal sin señal, con su anarquía de danzantes puntitos blancos y negros. Y un ruido desagradable y uniforme que, en conjunto, nos ofrece la visión más irritante de la nada en absoluto.

Tanto el exceso de desorden (o de *entropía*, como decimos técnicamente) como el de orden resultan insípidos, aburridos. Ambos extremos merecen, sin apelación posible, la etiqueta de *nada*.

La característica principal de cualquier *nada* es su simetría. Piense, por ejemplo, en un espacio uniforme, infinito, vacío y eterno. Usted puede estar en cualquier parte, en cualquier momento, y no notará la diferencia. No podrá distinguir un punto de otro. Tampoco podrá determinar el instante de tiempo en el que se encuentra, pues todo momento es equivalente, dada la eternidad hacia el pasado y hacia el futuro. Pero hay más. No podrá tampoco discernir la dirección en la que mira. Serán todas equivalentes.

Si ahora introducimos una partícula dentro de este vacío, una impureza inmóvil, romperemos de inmediato parte de la simetría original. Quedará la simetría temporal, ya que todos los instantes de tiempo siguen siendo equivalentes, a pesar de la presencia de la partícula estática. También quedará la simetría rotacional, pero sólo en torno a la

partícula, ya que todas las direcciones son equivalentes si se observa el espacio desde ella. Podremos determinar a qué distancia de la partícula estamos, pero no la dirección respecto de ésta. La ruptura de la simetría original es señal inequívoca de la presencia de *algo*. La simetría majestuosa de la *nada* se ve mancillada, mermada, por la inoportuna existencia de *algo*.

La nada caliente

Una gran simetría es la característica típica, pero como veremos no necesariamente indispensable, de lo que se conoce como el *vacío*. Éste es el estado de menor contenido energético de cualquier sistema físico. Para adentrarnos en la etiología de la nada, en su versión primigenia, lo más prudente es retroceder unos 13.700 millones de años hasta encontrarnos con la invicta simetría de la nada caliente sucedida algunos instantes después de la gran explosión que dio origen al Universo.

Durante una ínfima fracción de segundo después del Big Bang, el Universo fue extremadamente caliente. Un amasijo uniforme de partículas elementales y sus interacciones. Un televisor fuera de sintonía. La agitación térmica es siempre sinónimo de simetría, puesto que cualquier estructura que llegue a formarse al azar, cualquier lugar o dirección preferencial, se desvanecerá rápidamente debido a la aleatoriedad de las fluctuaciones. El estado del Universo primigenio es la versión más

acabada de la nada caliente. Su simetría es máxima, pero no como fruto del orden perfecto. Se trata más bien del desorden perfecto.

Una forma cotidiana de este fenómeno la podríamos encontrar en los fragmentos de magnetita que emanan de las entrañas de un volcán durante la erupción. Esta piedra mineral, una vez fría, se comporta como un imán, tal como comprobó hace algunos milenios el pastor Magnes al caminar sobre ellas con sus zapatos remachados con clavos de hierro. Al emerger de la fisura de un cordón volcánico, en cambio, la magnetita está caliente y sin sus poderes magnéticos. Esto ocurre porque el imán puede pensarse como una enorme colección de pequeños imanes microscópicos. A altas temperaturas, la agitación térmica provoca una orientación aleatoria de estos, cancelándose el magnetismo de unos con otros. Aún siendo *algo*, esos guijarros que el volcán llega a escupir con violencia a la atmósfera son un ejemplo sencillo de la nada caliente.

La nada fría

En su expansión, el Universo se ha ido enfriando hasta alcanzar su temperatura actual de poco más de dos grados por encima del cero absoluto. La nada ardiente de los orígenes transmutó en todo lo que observamos con nuestros telescopios. De la quietud que permitió el descenso de la temperatura pudo surgir también la nada fría, esa que

podemos ver, por ejemplo, en las enormes regiones solitarias del espacio intergaláctico. Pero el vacío frío es sólo aparente. La Mecánica Cuántica nos dice que es imposible extraer toda la energía de un sistema físico. Hay cierta efervescencia mínima que siempre estará presente en el vacío. Un burbujeo microscópico que es, en principio, respetuoso de las simetrías del vacío, pero que en ocasiones puede llevarlo a adoptar una estructura asimétrica. Un empujoncito cuántico que puede romper la uniformidad de la nada y permitir que fenómenos interesantes sucedan cuando intentamos extraer el máximo de energía de un sistema físico.

Pensemos nuevamente en el pedrusco de magnetita que yace a metros de la orilla del lago que se extiende bajo las faldas del volcán. Podríamos pensar, ingenuamente, que al enfriarse y aplacarse la agitación térmica, los imanes microscópicos tenderán a quedar, en algún momento, inmóviles pero con direcciones aleatorias. Como si oprimiéramos la tecla de pausa en el canal del televisor que no ha sido sintonizado. El hormigueo de los puntos negros y blancos cesará, pero su distribución espacial seguirá gozando de la caótica simetría de lo puramente aleatorio.

Pero lo que ocurre en realidad es muy distinto. Los pequeños imanes microscópicos que conforman la piedra dejan de estar a merced del zarandeo térmico y comienzan a percibir la interacción magnética de sus vecinos. Y tal como una brújula

se orienta con el campo magnético terrestre, prefieren alinearse unos con otros. La simetría de la nada caliente no permitía la existencia de alguna dirección preferencial hacia donde estos microimanes pudieran apuntar. Sólo una vez que el azar encuentre a un número suficiente de ellos orientados en una dirección dada, la simetría se romperá para siempre, provocando el alineamiento del resto. Los pequeños campos magnéticos de cada uno colaborarán en la creación de un campo que podrá ahora apreciarse macroscópicamente. Éste, que *a priori* podía tener una orientación arbitraria, adoptará providencialmente una bien determinada, rompiendo la simetría original. La magnetita se habrá convertido en un imán.

El efecto es similar al que ocurre en una mesa circular en la que ninguno de los comensales sabe si le corresponde el pan que se encuentra ligeramente a su izquierda o a su derecha. Mientras ninguno de ellos eche mano de su mendrugo, las dos alternativas son igualmente probables. En cuanto el menos paciente de ellos toma una decisión, condena a la totalidad de la mesa a una opción inequívoca. La simetría original ha desaparecido.

El lugar donde la nada acontece

La nada cuántica burbujea, viva, inquieta. Pares de partículas, materia y antimateria, se crean fugazmente en la nada, para luego de una breve existencia volver a desaparecer en ella. Y no se

trata sólo de especulaciones teóricas. La energía de la nada se puede medir. Fue el físico holandés Hendrik Casimir quien predijo en 1948 que la energía de la nada podía provocar una pequeña fuerza entre dos placas metálicas cercanas, fenómeno que fue confirmado inequívocamente en los experimentos medio siglo después. Casimir, por entonces casi nonagenario, pudo disfrutar de uno de los goces más excelsos, el de una predicción teórica que es confirmada en el laboratorio.

Hoy sabemos que la energía del vacío del Universo es la responsable de su expansión acelerada, de la que hablaremos a continuación. La demostración experimental de este hecho inquietante fue premiada con el Nobel de física en 2011. Esta energía de la nada, a la que se suele denominar energía oscura, según la cosmología representa el 70% del contenido energético del Universo. Una cantidad nada despreciable. Sobre todo tratándose de *nada*. Somos *nada* o, para ser más precisos, casi tres cuartas partes de *nada*.

¿Por qué hay algo en lugar de nada? La nada es simetría perfecta y es necesaria la imperfección para que el Universo sea más interesante que un canal de televisión fuera de sintonía. Es que la vida, la biología, la Naturaleza, aborrecen lo perfecto. La ruptura de la simetría es necesaria, además, para que se produzca el parto supremo, el del espacio y el tiempo, y las leyes que los gobiernan.

Sin embargo, el Universo es dialéctico y si bien necesita *algo*, cuando menos una imperfección

a la que denominar vida, precisa también de la nada. Y las proporciones son escandalosas. Tres partes de nada por cada parte de algo. Nadie habría esperado nunca que la nada fuera el escenario fascinante en que algo debiera tener lugar. ¿Nadie? En la misma Nueva York de Seinfeld y Constanza, en el verano de 1979, David Byrne y Jerry Harrison le escribieron una canción al cielo: «It's hard to imagine, that nothing at all, could be so exciting, could be this much fun. Heaven, heaven is a place, a place where nothing, nothing ever happens». El cielo, como intuyeron los *Talking heads*, es un lugar donde la nada acontece. O nunca acontece. Que no es lo mismo, pero es igual.

QUE SE QUEDE EL INFINITO SIN ESTRELLAS

¿Qué ocurrirá al final de la saga? «Se sabrá tanto de las estrellas como de cicatrices» cantaba Silvio Rodríguez en el evocador *Rosana* de su álbum *Descartes*, publicado en 1998. Ese mismo año, sin embargo, grandes novedades relativas al fin de la saga cósmica eran anunciadas poco más al norte, poniendo en tela de juicio el valor de verdad de este verso. Para ser más precisos, quizás de estrellas se sepa por un largo tiempo, pero de galaxias, en apenas algunos billones de años, no quedarán ni cicatrices.

La Academia Nobel ha certificado oficialmente, con la entrega de su célebre premio a los estadounidenses Saul Perlmutter, Brian Schmidt y Adam Riess, que el Universo se encuentra en una etapa de expansión acelerada. Dado que la velocidad de la luz es finita y constante, esto significa que, progresivamente, sin remedio, galaxias enteras se alejarán a velocidades cada vez mayores, al punto de, literalmente, perderlas de vista para siempre.

Un poema que comience con «Puedo escribir los versos más tristes esta noche, escribir por ejemplo, la noche está estrellada y tiritan, azules, los astros a lo lejos», resultará de una irrealidad indescifrable para los futuros lectores de Pablo Neruda.

La oscuridad de la noche

Algo tan simple como la oscuridad de la noche puede constituir un gran misterio. Hasta hace un siglo era usual la imagen del Universo como un espacio infinito, estático, eterno y espolvoreado homogéneamente de estrellas. Esta visión conduce inexorablemente a una paradoja que lleva el nombre del médico y astrónomo alemán Heinrich Olbers, si bien fue formulada más de un siglo antes por Edmund Halley, el primero en identificar la periodicidad del cometa que lleva su nombre. ¿Por qué la noche es oscura?

«Si la sucesión de estrellas fuera ilimitada, el fondo del cielo presentaría una luminosidad uniforme, ya que no podría haber absolutamente ningún punto hacia el que pudiéramos mirar en el que no existiera una estrella». Así presentaba la paradoja Edgar Allan Poe en *Eureka: un poema en prosa*, libro único e inimitable, una suerte de tratado cosmológico dictado por la intuición —o por un insidioso cuervo, ¿quién lo sabe?—, que el genial bostoniano escribió en la antesala de su muerte. El cielo nocturno debería, por lo tanto, ser brillante como la superficie del Sol. O más bien ser luminoso y claro, con puntos de mayor o menor intensidad según la distancia a la Tierra de la estrella correspondiente.

¿Por qué es oscura la noche? Una pregunta tan sencilla, fácil de formular, al alcance de cualquier mortal, y que no pudo contestarse satisfactoriamente durante siglos. Hubo respuestas fallidas de todo tipo, pero el primero en esbozar una solución sensata no podía ser otro que el supremo autor de los mejores cuentos de terror, alguien que se jugaba demasiado con la negrura de la noche. «La única manera, entonces, de que podamos comprender los abismos cosmológicos que encuentran nuestros telescopios, sería suponer que la distancia hacia ese fondo oscuro es tan inmensa que ningún rayo proveniente de allí haya sido capaz de alcanzarnos aún», sentenció Poe con brillantez. La clave está en el *aún*. El Universo debía tener origen en un instante pasado, de modo que la luz de las estrellas más lejanas *aún* no hubiera podido llegar a nuestros ojos. Así, cuando en una noche despejada vemos las estrellas, la oscuridad del cielo circundante nos está contando que el Universo no puede ser infinitamente vasto y, al mismo tiempo, infinitamente viejo.

El universo indómito del sacerdote abstemio

Si el nacimiento del Universo fue intuido por un escritor apasionado de la *absenta*, la teoría del *Big Bang* fue concebida por un abstemio sacerdote

católico. El belga Georges Lemaître era, además, físico. Su teoría fue recibida en un comienzo con violentas críticas. Y no tanto por parte de otros miembros del clero, quienes probablemente verían en el origen del Universo indicios de la creación divina, como provenientes de sus colegas físicos. «Su matemática es correcta, pero su física abominable», le dijo Albert Einstein al conocer su trabajo en octubre de 1927.

Lemaître estaba muy al corriente de las observaciones astronómicas de aquella época tras su estancia de un año en Harvard. Pensaba que la única forma de explicarlas era a través de un universo en expansión, en donde la distancia entre galaxias aumentaba a medida que transcurría el tiempo. Para demostrarlo utilizaba las ecuaciones de la Teoría de la Relatividad General. El propio Einstein ya había visto que su teoría predecía un Universo que podría estar en una fase de expansión pero que, más tarde o más temprano, estaba condenado a colapsar bajo los efectos de la atracción gravitatoria. La sola idea de que el Universo pudiera tener una fecha de nacimiento le resultaba desagradable, lo que le llevó a la convicción de apostar por un universo estático e inmutable a gran escala.

Para domar a los astros y conseguir su inmovilidad, Einstein debió hacer lo que más tarde consideró la peor metedura de pata de su vida. Modificó sus ecuaciones de la única manera posible, según descubrió él mismo, agregándoles un *término cosmológico*. Éste tenía el efecto de trastocar la gravedad a distancias grandes y hacerla repulsiva. Así, la atracción a distancias pequeñas y la repulsión a escalas cósmicas podría compensarse, permitiendo un universo de galaxias inmóviles.

Pero la opinión del propio Einstein fue cambiando a medida que la evidencia experimental se hacía más y más sólida. Los resultados del astrónomo estadounidense Edwin Hubble, en 1929, no sólo terminaron por convencer a la comunidad científica de que las galaxias se movían, apartándose de nosotros. Mostró además que la velocidad con que se alejaban era proporcional a la distancia que nos separa de ellas. Es lo que conocemos actualmente como la ley de Hubble. Este tipo de comportamiento es precisamente el que se espera en un universo en expansión. Si las galaxias se alejan unas de otras, razonó Lemaître, significa que en el pasado cada vez debieron estar más cerca. Todo el universo debió, en algún momento, concentrarse en un punto infinitamente denso, *el átomo primigenio*, en lo que hoy denominamos la teoría del *Big Bang*.

Si bien era claro a mediados del siglo XX que el Universo se expandía, nadie sabía cual sería su destino. ¿Continuaría ensanchándose de forma indefinida? ¿Se iría frenando hasta comenzar a contraerse y terminar en un gran aplastamiento, el *Big Crunch*? A pesar de que no se contaba con medidas suficientemente precisas que permitiesen dar

un veredicto, la última era, hasta 1998, la imagen más aceptada. Las galaxias se alejan unas de otras como se aleja de la Tierra una piedra que lanzamos hacia arriba. Eventualmente, a menos que la lancemos con demasiado ímpetu, la fuerza de gravedad se impondrá, la piedra frenará y comenzará a caer. Acabará por volver a reunirse con el planeta desde el que partió.

Supernovas y sus usos

Una forma de predecir el futuro del Universo consistía en hacer más mediciones, muy precisas y de galaxias muy lejanas. El sino cósmico quedaría a la vista a través de pequeñas desviaciones de la ley de Hubble. Realizar estas mediciones, poder hurgar en el desván de los confines del Universo, parecía un desafío desmesurado para una especie que, en definitiva, habita en un pequeño planeta desde el que las profundidades de la bóveda celeste se presentan oscuras e inescrutables. Pero allí estaban las supernovas para iluminar el camino.

Medir la distancia que nos separa de objetos lejanos en el espacio no es un problema sencillo. Cuando contemplamos una estrella, el brillo de ésta puede disminuir tanto por su lejanía como por su luminosidad intrínseca. Para conocer la distancia, los astrónomos eligen objetos cuyo brillo intrínseco pueden inferir de algún modo independiente. Las supernovas son uno de estos objetos. En particular, una clase de supernovas denominada *tipo Ia*. Se trata de la explosión de las estrellas llamadas enanas blancas, pesadas como el Sol pero pequeñas como la Tierra. Tiene lugar cuando se forma un sistema binario de dos estrellas, una de las cuales roba materia a su compañera por efecto de la atracción gravitatoria. Llega un momento en que la estrella que engorda se hace inestable y colapsa, provocando una súbita explosión nuclear de tal intensidad que su brillo alcanza a ser el mismo que el de una galaxia entera.

Si bien estos eventos son inusuales (un puñado por milenio en la Vía Láctea), observando muchas galaxias podremos encontrar algunas de estas supernovas en un tiempo razonable. Pero la característica más importante de estas explosiones es la manera en la que la intensidad de su resplandor alcanza un máximo y va disminuyendo en el curso de algunas semanas. La forma de esta curva está relacionada con el brillo intrínseco de las supernovas, lo que permite a los astrónomos determinar la distancia a la que se encuentran. Su velocidad relativa se calcula por el corrimiento al rojo de la luz emitida, debida al efecto que lleva el nombre del físico y matemático austríaco Christian Doppler, tal como lo hizo Hubble.

El oscuro futuro del Universo acelerado

La determinación precisa de distancias a galaxias lejanas permitió a los grupos galardonados con el premio Nobel observar que la ley de Hubble, efectivamente, dejaba de ser cierta a distancias

suficientemente grandes. Aquellas galaxias que se alejan de nosotros a una velocidad determinada, se encuentran algo más lejos de lo que predice dicha ley. De aquí se desprende un resultado totalmente inesperado. Inquietante. La expansión del universo no sólo no se está frenando. ¡Se está acelerando!

El resultado fue confirmado desde entonces por otras observaciones de naturaleza completamente distinta, por lo que sólo queda aceptarlo con resignación e intentar esclarecerlo. ¿Cómo explicar un fenómeno tan extraño? Bueno... ¡ya dijimos cómo! Necesitamos una fuerza de gravedad repulsiva a grandes distancias... ¡el término cosmológico que introdujo el propio Einstein! La así llamada *constante cosmológica*, aquella presunta metedura de pata del genial físico judío, parece ineludible para poder explicar la aceleración cósmica. Cuando menos es necesario algún elemento que juegue el papel de la constante cosmológica, que se comporte de manera similar, al que genéricamente se denomina *energía oscura*. Se comporta como un fluido que llena el Universo dando cuenta de nada menos que el 70% de su contenido energético. Esto es, desde ya, desalentador. Sobre todo cuando sabemos que del resto, 25% es materia oscura y apenas el 5% corresponde a la materia que nos rodea, nos conforma y para la cual tenemos teorías muy satisfactorias.

Las leyes de la física cuántica dejan en evidencia, como vimos antes, que el vacío absoluto no

existe. Que aún en ausencia de materia hay una suerte de burbujeo microscópico en el espacio y el *vacío* del universo intergaláctico no puede ser una excepción. Esta vivacidad que presenta a nivel cuántico el espacio yermo proporciona una *energía del vacío* que tiene exactamente las propiedades físicas peculiares que necesita la energía oscura. Un breve cálculo nos demuestra, sin embargo, que de acuerdo a nuestras teorías vigentes y comprobadas de la materia la energía del vacío es 120 órdenes de magnitud (¡un uno seguido de 120 ceros!) mayor que la observada. A nivel cuantitativo, se podría decir que se trata de la predicción más fallida de la historia de la ciencia. Éste es el afamado *problema de la constante cosmológica*, quizás el misterio más importante de la física teórica de nuestros días. No entendemos por qué la constante cosmológica que se observa es tan pequeña dando, al mismo tiempo, cuenta de casi tres cuartas partes del contenido energético del Universo.

Es un tanto humillante, tras una larga historia de victorias científicas, vernos tan abrumadoramente perdidos ante los dictámenes del cosmos. Pero el intelecto humano ya no se rinde ante el misterio y la búsqueda seguirá su marcha hasta que encontremos una respuesta que nos permita entender mejor el *hacia dónde vamos* y el *porqué* de nuestro destino. Confiamos en que ese momento llegue antes de que veamos desaparecer tras el horizonte cosmológico, con honda

tristeza, a la penúltima galaxia. Andrómeda, nuestra vecina más cercana, y la Vía Láctea colisionarán para formar una única galaxia que navegará solitaria en un universo vacío. Un astrónomo de esa infausta embarcación habrá perdido para siempre cualquier referencia a la riqueza y diversidad galáctica del universo pretérito. Y al enamorado del bolero *Piel canela*, ¡al fin!, le quedará lo único que le importaba: el negro de los ojos y el aroma de la piel de su mujer amada. En el jardín de la noche no habrá ni siquiera una rosa iluminada.

LA IRRESISTIBLE BELLEZA DE SUSY

No es extraño, ya se ha dicho en estas páginas, que la ciencia busque simetría. En ella residen los cimientos de la belleza y la simplicidad, dos de los motores principales de la actividad científica. La simetría es la estética del orden. El imperio del círculo y la fascinación que nos provoca su enigmático e incruento tirano al que bautizamos con la letra griega π, la p de *perfección*. O el de la eternidad inmutable, sin presente ni pasado. La mente humana encuentra sosiego en la simetría y puede llegar a postrarse ante ella. No puede ser una sorpresa, entonces, que la simetría impregne a la ciencia en todos sus ámbitos, convirtiéndose en deliciosa y enfermiza obsesión.

La nada es bella

La *nada*, esa hoja en blanco sobre la que se inscribe la realidad física, se ve igual en toda su extensión, infinita y despojada. Desde la perspectiva de nuestra mente, la nada es el estado de las cosas

más natural, el que tiene costo cero. Es el *no va más* de la simetría. En la nada no existe ninguna dirección privilegiada, ningún instante de tiempo especial, ni un antes ni un después, ni la noción de zurdo o diestro. No existe ni lo positivo ni lo negativo. Si el universo consistiera de nada, no habría pregunta alguna que hacer. No habría ciencia.

Las leyes científicas fundamentales tienen algunas de las propiedades de esa nada. A las leyes de Newton, por ejemplo, no les importa en dónde ni a qué hora pongamos a un planeta a girar en torno a una estrella. La trayectoria predicha será idéntica si la estrella tiene la misma masa. La simetría ha sido, desde mediados del siglo XX, el motor y la fuente de inspiración en la búsqueda de las leyes de la física básica.

La existencia de *algo*, en cambio, es disruptiva. Nos abruma con sus preguntas y misterios. Su sola presencia establece un lugar del espacio singular, aquél en el que se encuentra ese algo, y un instante de tiempo en el que tiene lugar. El algo rompe simetrías. Esto vale para cada porción de materia o energía que habita nuestro universo. Pero no las rompe todas. Si ese algo, por ejemplo, es un electrón que se mueve, ya no será lo mismo el antes que el después, ni lo positivo y lo negativo ni, dado su giro intrínseco, lo zurdo y lo diestro. Sin embargo, los principios básicos sobre los que se sostienen las leyes de la física nos dicen algo sorprendente: da lo mismo un electrón zurdo que

viaja hacia el futuro que un positrón diestro que viaja hacia el pasado.

Esto se conoce como *simetría CPT*. La *C* por el cambio en el signo de la *Carga* eléctrica, la *P* por la *Paridad* (que intercambia lo zurdo y lo diestro) y la *T* por la inversión *Temporal*. Las leyes fundamentales del Universo no se aplican a la imagen especular de éste, ni tampoco si cambiamos todas las cargas negativas por positivas y viceversa. Tampoco es lo mismo futuro que pasado. Pero, sorprendentemente, hacer estas tres transformaciones juntas nos deja con un Universo sujeto a las mismas leyes. Esto no es el resultado de observaciones en un laboratorio. Es un teorema, demostrado a mediados de los '50 por el alemán Gerhart Lüders, el gran Wolfgang Pauli y el recientemente fallecido físico italiano Bruno Zumino.

Dios juega a los dados

Hay un aspecto novedoso en la simetría *CPT*, que la distingue de aquella de los desplazamientos espaciales y temporales de las leyes de Newton. Si bien las letras *P* y *T* corresponden a transformaciones que operan sobre el espacio y el tiempo, la *C* es de naturaleza distinta. Actúa sobre el contenido de materia, modificándolo. Cambia electrones por positrones. La simetría *CPT* es una licencia para transformar las partículas elementales, unas en otras, asegurando que el resultado final deja a la Naturaleza y sus leyes tal como estaban. Estas

simetrías internas son muy comunes en la física contemporánea y suelen intercambiar partículas de naturaleza similar: *bosones* y *fermiones* por separado. Más aún, no tenemos otro lenguaje para describir nuestras teorías en la actualidad que no sea el que nos proporcionan estas simetrías. Todo el zoológico de partículas que conocemos está organizado según los patrones que éstas dictan. Es como si las partículas se agruparan y uno pudiera pasar de una a otra haciendo uso de estas simetrías, tal como se cambia en un dado una cara por otra mediante una rotación. Saber qué partículas están en el mismo dado determina muchas de sus propiedades e interacciones.

La materia, ya lo dijimos, está constituida por átomos cuyo núcleo está poblado de neutrones y protones —en definitiva, sistemas compuestos por *quarks*— y una nube de electrones orbitando a su alrededor. Todos son *fermiones*. Partículas que satisfacen el principio de exclusión de Pauli. Por ello las propiedades de los átomos cambian tanto al hacer pequeñas variaciones en su estructura. El cloro, por ejemplo, tiene 17 electrones. El argón tiene tan sólo uno más. La diferencia, por nimia que parezca, no es para nada irrelevante. El argón es un elemento inocuo, mientras que el cloro es venenoso. Diferencias de un solo fermión pueden producir cambios radicales por el hecho de que necesariamente deben ocupar estados inexistentes o vacantes con anterioridad. La luz, en cambio, está formada por partículas que pueden acumularse en grandes cantidades en un mismo punto del espacio: los *fotones*. Al igual que ellos, todas las partículas portadoras de las interacciones fundamentales son *bosones*: desde los *fotones* hasta los *gluones*, pasando por los hipotéticos *gravitones*.

Fermiones y *bosones* tienen roles tan distintos y diferencias tan abrumadoras, que parecería descabellada la sola idea de que también ellos fueran *distintas caras de un mismo dado*. Que, por lo tanto, diera lo mismo ser partícula que interacción, intercambiables por la acción de una simetría que convertiría al Universo en «la vidriera irrespetuosa de un gigantesco cambalache». Que el trueque de unos por otros fuera tan inocuo, tan imperceptible, como la rotación alrededor de una esfera perfecta. Se trataría de una simetría superlativa, exagerada. Por eso, cuando a principio de los '70 aparecieron los primeros indicios de que, al menos a nivel teórico, la posibilidad de semejante quimera podría tenerse en consideración, sólo cabía un nombre para ella: *supersimetría*.

Queremos tanto a SUSY

La *supersimetría*, a la que llamamos coloquial y cariñosamente *SUSY*, nos dice que la materia y las interacciones son dos caras de la misma moneda. Se trata de algo tan disparatado en apariencia, tan alejado de nuestra experiencia observacional, que es difícil entender por qué llegó a ser tomada tan

en serio por los físicos de partículas. Ocurre que la supersimetría dota a las teorías que la contienen de características muy deseables. Aquí comentaremos tan sólo una de ellas —pero hay más—: la posibilidad de que a escalas muy altas de energía, como aquellas que tuvieron lugar en los primeros instantes del universo, todas las fuerzas de la Naturaleza puedan unificarse en una sola.

Para ello comencemos hablando de una propiedad muy curiosa de las interacciones fundamentales —la penúltima sorpresa que nos tiene reservada la invisible realidad del universo cuántico—: su intensidad depende de la escala de energía (o de longitud) a la que las exploremos. Las propiedades de los constituyentes fundamentales de la materia pueden ser drásticamente distintas cuando se las observa en dos aceleradores de partículas que operan a distintas energías. El caso más interesante es el de la llamada interacción fuerte, que opera sobre los *quarks*. A altas energías, cuando logramos que dos *quarks* estén muy cerca, su interacción es casi inexistente. Como si no supieran el uno del otro. Sin embargo, si intentamos alejarlos veremos que aumenta la interacción hasta el punto de impedirnos poder separarlos. Es como si estuvieran unidos por una goma elástica muy larga. Cuando están cerca, la goma está fláccida y no ejerce ninguna fuerza sobre ellos, pero al intentar separarlos, llegará el momento en el que sentiremos la oposición producida por la fuerza de tensión elástica.

Esta propiedad, de naturaleza cuántica, hace que la intensidad de las distintas interacciones fundamentales cambie de forma diferente con el aumento de la energía. La fuerza nuclear fuerte, como dijimos antes, disminuye su intensidad, mientras que la de la fuerza electromagnética y nuclear débil aumenta. Es bastante natural pensar que deba existir alguna escala de energías en la que todas las fuerzas de la Naturaleza tengan la misma intensidad, revelando su origen común en el caldo ardiente del *Big Bang*. En el comienzo tendríamos un Universo cuyas interacciones serían idénticas, una sola, y su apariencia distinta actual sería el resultado del enfriamiento que produjo su expansión. Esta unificación del Universo temprano aumentaría el grado de simetría. Así, al nacer, el espacio inabarcable en el que hoy divisamos más de cien mil millones de galaxias habría sido muy próximo a la nada.

Lamentablemente, las ecuaciones del Modelo Estándar, la teoría que gobierna a las partículas elementales, no conducen por sí solas a esa unificación. Cuando la descabelladamente hermosa idea de la supersimetría comenzó su andadura, grande fue la sorpresa y el contento al comprobar que, incluyendo sus ingredientes en el *Modelo Estándar*, las tres interacciones se unifican a una escala de energías perfectamente compatible con la historia del Universo temprano. Un resultado limpio y simple. ¡Contundente! ¿Verdadero?

Bruno Zumino fue uno de los padres de *SUSY*. Un hombre afable que luchó por mostrarnos que el Universo no es tan distinto a la nada. Por llevarnos a eso que todo científico, todo humano, quiere escuchar: la Naturaleza no es un extraño, complejo e improbable fenómeno. Por el contrario, es la consecuencia inevitable de lo más simple y evidente. Es cuestión de encontrar el ángulo correcto para poder apreciarlo.

Irrealidades visibles

DA VINCI CONTEMPORÁNEO

Richard Feynman era un curioso ejemplar de genio travieso. Le gustaba practicar lo que en las grandes universidades de Estados Unidos se conoce como *hacking*, que consiste en asistir a una charla con el único objeto de atosigar al conferencista con críticas y preguntas. El fin último era divertir a sus colegas, con altas dosis de ingenio y sarcasmo. Cierto día, Feynman se dirigía a la charla en *Caltech* de un conocido físico inglés y el cuerpo le pedía una dosis urgente de *hacking*. Estaba dispuesto a hacerle la vida imposible al conferenciante, y así lo hizo saber en el café, para que todos estuvieran atentos. La charla progresaba y, en contra de lo que todos esperaban, Feynman permanecía callado y muy atento. Un físico que se sentaba en la fila de atrás interpretó que debía romper el hielo e inició el acoso con una retahíla de objeciones. A la tercera, Feynman se giró hacia su colega y, muy serio, le gritó «¡cállate ya! ¡escucha lo que este hombre tiene que decir!». Ese hombre era Roger Penrose y

había logrado lo que ningún otro: torcer la voluntad de Feynman con el brillo de sus ideas.

Matemático de profesión, Penrose es quizás quien mejor se ajusta a la etiqueta de ser un Da Vinci de nuestro tiempo. Un pensador singular, arriesgado, cuyas contribuciones son fundamentales y polémicas, en campos tan variados como la gravitación, la geometría, la neurociencia, la cosmología y el arte. Un genio sin atenuantes que, no obstante, habla siempre en un tono apacible, mesurado y con una modestia inverosímil. Luce siempre un aire despreocupado y el cabello hecho un torbellino sobre sus cejas arqueadas y su mirada profunda.

En el nombre del padre

Tras graduarse en Cambridge, Lionel Penrose, su padre, atraído por los rumores que hablaban de una nueva forma de abordar la mente humana, viajó a Viena para entender qué era eso del psicoanálisis de primera mano, con Sigmund Freud. Fascinado por el corpus teórico que éste había edificado, Lionel regresó a Inglaterra con la intención de dedicarse al psicoanálisis. En aquellos tiempos se autorizaba la terapia psicoanalítica sólo a aquellos que tuvieran el título en medicina. Decepcionado por este contratiempo y espoleado por su motivación última, Lionel Penrose hizo la carrera de medicina en menos de tres años. Pero la prisa no le hizo llegar antes. Le hizo llegar a otro sitio.

Al acabar la carrera, le parecían cuestionables los principios científicos del psicoanálisis y se dedicó a la genética, convirtiéndose en un pionero en el estudio del autismo y de las bases genéticas del retardo mental.

Roger Penrose habla de su padre con conmovedora admiración. Siempre encontró en él al interlocutor perfecto para discutir sus ideas más originales. Siendo estudiante de doctorado, con 23 años, asistió a una conferencia en Amsterdam y en un paseo que realizó una tarde libre, le llamó la atención el anuncio de una exposición de un artista contemporáneo, un tal Maurits Cornelis Escher. Lo que vio allí le impactó profundamente. Figuras imposibles, paradojas visuales, sortilegios construidos con perspectivas mentirosas, creaban un universo único que Penrose disfrutó, primero, y luego quiso entender. Discutió con su padre sobre el asunto y ambos comenzaron a trabajar sobre las figuras imposibles. Así salió a la luz el triángulo de Penrose, una figura a la que se catalogó como *la imposibilidad en su forma más pura*.

Estudiaron otras figuras y escribieron un trabajo inclasificable, que decidieron publicar en el *British Journal of Psychology*, aprovechando una vieja amistad de Lionel con un editor, de la época en la que perseguía el sueño de ser psicoanalista. El padre de Penrose envió el trabajo a Escher, quien respondió con gran interés y acabó utilizando las bases geométricas de estas figuras para

crear algunas de sus obras más famosas, como *La cascada*. Roger Penrose visitó a Escher, en 1971, en la casa de retiro para artistas en la que vivía y aún trabajaba. En reconocimiento al uso que había hecho de sus aportaciones a la topología, el artista le dijo al matemático que se llevara una de sus litografías. Pocos meses después falleció.

Los agujeros negros y el origen del Universo

Una de las consecuencias más sorprendentes de la Teoría de la Relatividad General de Einstein es la existencia de agujeros negros, criaturas fantásticas del bestiario universal que se caracterizan por dos aspectos por demás extraños. Primero, ser un punto de dimensiones infinitesimales con una densidad de materia infinitamente grande: lo que se conoce como una *singularidad*. Segundo, estar rodeados por una superficie, el *horizonte de eventos*, que tiene la funesta propiedad de que cualquier objeto que la traspase no podrá salir jamás y acabará alimentando aún más a la singularidad. Desde su descubrimiento matemático a manos de Karl Schwarzschild —quien apuró los cálculos en las trincheras del frente ruso y falleció unos meses más tarde—, poco después de que Einstein publicara la teoría, lo que hoy llamamos agujeros negros fueron recibidos como una curiosidad matemática cuya existencia en la Naturaleza no debía considerarse como una posibilidad seria.

Tras un cuarto de siglo, sin embargo, Robert Oppenheimer y Hartland Snyder demostraron que

una estrella suficientemente pesada podía colapsar bajo el efecto de su propio campo gravitatorio hasta llegar al estado descrito por Schwarzschild. Poco después, Oppenheimer sería el principal responsable del proyecto que alumbró las bombas atómicas que Estados Unidos arrojó en Hiroshima y Nagasaki, pero ésa es otra historia. Las hipótesis que estaban detrás de sus cálculos, no obstante, no eran lo suficientemente realistas como para vencer la desconfianza de la comunidad científica. Consideraban un colapso perfectamente esférico en el que cada partícula de la estrella viajaba para encontrarse con las demás en el centro, algo difícil de imaginar en la realidad.

En 1965, Roger Penrose, junto a un joven físico que comenzaba a padecer los efectos de una esclerosis lateral amiotrófica que le había sido diagnosticada dos años antes, Stephen Hawking, en un trabajo realizado casi completamente mediante conversaciones telefónicas, demostraron que la forma precisa en la que ocurre el colapso no es importante. Las singularidades son habituales, genéricas y siempre ocurrirán durante la evolución del Universo. En el futuro y en el pasado. Eventos en los que el espacio y el tiempo nacen o mueren, como el Big Bang y los agujeros negros, no sólo son probables en la Teoría de la Relatividad General, sino que resultan sencillamente inevitables. Ese mismo año, Arno Penzias y Robert Wilson habían descubierto accidentalmente que el Universo

emitía radiación térmica, desde todas las direcciones, indicando que en el pasado tendría que haber sido más pequeño y más caliente. Los agujeros negros, bautizados así por John Archibald Wheeler en 1967, debían existir. Inexorablemente. Y así fue como, en 1973, *Cygnus X-1* fue el primer agujero negro identificado en nuestra galaxia, a sólo 6000 años luz de la Tierra.

El teorema de Hawking y Penrose mostraba que las singularidades del campo gravitacional debían ser usuales, pero nada decía del horizonte de eventos. Es muy difícil para un físico aceptar la existencia de una singularidad. Allí la teoría deja de tener sentido. Si está rodeada por un horizonte de eventos, en cambio, la cosa es más razonable. Cuando menos, no hay forma de que alguien viaje a conocerla y vuelva a relatar su experiencia. Penrose postuló su famosa *conjetura de la censura cósmica*. En ella dice, en esencia, que no existen singularidades *desnudas*; todas deben estar cubiertas bajo el pudoroso velo de un horizonte de eventos.

Mecánica cuántica y conciencia

Si un agujero negro es un fenómeno extraño, hay otro que supera con creces su misterio y dificultad de estudio: la conciencia. En este terreno de lo aparentemente imposible es donde Roger Penrose se siente como pez en el agua. Así es como propuso una de las más extrañas y audaces ideas sobre la conciencia. El tema es tan complejo que

incluso es difícil postular una pregunta. Lo que sucede es que, a diferencia de cualquier otro problema científico, la conciencia es una experiencia personal, en primera persona, intransferible. Veamos un ejemplo.

Estamos acostados en una cama con la luz apagada. Una infinidad de procesos biológicos están ocurriendo en nuestro cuerpo, dentro de cada una de sus células. Nuestro cuerpo funciona sin operador, automáticamente, sin necesidad de control. En cualquier momento podemos tomar conciencia de nuestra respiración. Nada ha cambiado. Sólo nuestra mirada interna que se concentra en el fluir del aire hacia nuestros pulmones. Ahora podemos cambiar la velocidad con que respiramos o incluso suspenderla por unos segundos, aunque sólo sea para decirnos que tenemos el control. Podemos concentrarnos en los olores y en las memorias que nos evocan. Pasamos así de un estado de *máquina respiradora* a un estado consciente, sin demasiados signos externos que nos delaten.

Alguien podría objetar que un electroencefalograma sí delataría nuestro nuevo estado. Pero, ¿es lo mismo un circuito neuronal con todas sus complejidades que la experiencia subjetiva que parece provocar? ¿Es posible simular un cerebro en un ordenador y dotarlo de conciencia? Roger Penrose piensa que no. No se trata de buscar respuestas sobrenaturales. Él cree que hay ciertas leyes de la física que aún no conocemos y que son necesarias

para la comprensión del fenómeno de la conciencia. Se trata de la gravitación cuántica, teoría que es además necesaria para explicar la naturaleza de las singularidades de los agujeros negros y el origen del Universo. Según Penrose, esta teoría tiene implicaciones más allá del contexto de la física gravitacional que podrían explicar el fenómeno de la conciencia.

En concreto, propone que el sustrato de la conciencia residiría en ciertos componentes celulares llamados *microtúbulos* que se encuentran en el citoplasma de las eucariotas y tienen funciones estructurales muy importantes. Los *microtúbulos* tienen unas pocas decenas de micrómetros de largo, lo que lleva a Penrose a especular sobre la posible relevancia de fenómenos de naturaleza cuántica que los involucren, planteando la posibilidad de que en ellos pueda residir la conciencia. La teoría ha sido ampliamente cuestionada por la comunidad científica. Se trata de un conjunto de ideas y argumentos excesivamente especulativos. Pero su punto esencial es que el fenómeno de la conciencia es, probablemente, imposible de explicar con la ciencia actual. Una nueva revolución científica podría ser necesaria para atacar el problema con propiedad.

Un quijote incombustible

Las contribuciones relevantes y originales de Penrose son demasiadas para hacerles justicia en

un texto tan breve. Fue él quien inventó, por ejemplo, el estudio de estructuras espaciales que nadie había imaginado jamás y que están en la base de los *cuasicristales*, cuyo descubrimiento le valió el premio Nobel de química a Dan Shechtman en 2011 y sobre los que hablaremos a continuación. ¿Debió haber compartido el galardón? Muchos creemos que sí. Él dice, con profunda convicción, que no.

A pesar de haber superado ya los ochenta años, no hay señales de que Roger Penrose esté pensando en tirar la toalla ni de que prevea dejar de avanzar tercamente hacia cualquier molino de viento que despunte en el horizonte de las fronteras del conocimiento, como si estuviera dispuesto a llevárselo por delante. En 2010 publicó el libro *Ciclos del tiempo* en el que cuestiona dos de los conceptos más consolidados de la cosmología contemporánea, el *Big Bang* y la *inflación*. Penrose retoma la idea de un Universo cíclico, pero lo hace con una vuelta de tuerca original y sorprendente: en cada *eón* o ciclo de vida, el Universo no dejaría jamás de expandirse, contra la imagen habitual de ciclos de expansión y contracción que se suceden interminablemente. Lo más impactante fue su afirmación de que la teoría podría ser comprobada de inmediato haciendo uso de los datos del fondo cósmico de microondas (*CMB* por sus siglas en inglés), la imagen más antigua que tenemos del Universo, medidos por el experimento *WMAP*

de la *NASA*, y más recientemente por el satélite *PLANCK*, de la Agencia Espacial Europea. Allí podríamos encontrar estructuras de círculos concéntricos debidas a violentas colisiones de agujeros negros gigantes sucedidas en el *eón* anterior. Nadie lo tomó muy en serio.

Como casi siempre, la mayor parte de la comunidad científica objetó sus ideas y las consideró extravagantes. Rocambolescas. Pero muchas otras veces se ha visto regresar a este quijotesco caballero británico de aire despreocupado, victorioso del frente de batalla cuando se le auguraba una sonora derrota.

CORAZÓN DE CUASICRISTAL

La mañana del 8 de abril de 1982, el físico israelí Dan Shechtman trabajaba solo en el microscopio electrónico del laboratorio del *National Bureau of Standards* en Gaithersburg, muy cerca de Washington. Allí observaba las marcas producidas por un haz de electrones al impactar sobre placas fotográficas, luego de pasar a través de un cristal construido a partir de una aleación de manganeso y aluminio. Esta suerte de radiografía de la estructura atómica del cristal es su huella digital. Lo que Shechtman observó esa mañana no podía ser cierto. Todo lo que se sabía hasta entonces en la teoría de los sólidos cristalinos, cimentado en rígidos teoremas matemáticos y décadas de evidencia experimental, hacía completamente imposible la existencia de un patrón como ése. «No puede existir una criatura así», se dijo a sí mismo. Tenía que haber un error. Quizás la muestra estaba contaminada o algo había fallado en el montaje experimental. Es lo esperable cuando éste arroja

un resultado inverosímil. Tal vez, sin embargo, había algo más. Eso que todo científico sueña, con el corazón palpitante, cuando es testigo de una observación anómala: estar frente al gran descubrimiento de su vida. Y así fue.

Los mosaicos de la Alhambra

Hay pocas imágenes más cautivadoras que la Alhambra iluminada por el sol del atardecer vista desde el mirador de San Nicolás. En su interior, una de las muestras más sobrecogedoras de arte islámico medieval en la que también es posible admirar la capacidad de abstracción y honda comprensión matemática de sus artistas. La imposibilidad de representar iconográficamente a su dios, sumada a la búsqueda de la máxima sofisticación y belleza a la hora de construir obras en su tributo, parece haber empujado a los musulmanes a desarrollar un entendimiento profundo de la geometría. Los mosaicos de la Alhambra, de gran complejidad, son una acabada muestra de ello. Un museo matemático que Dan Shechtman, asiduo visitante, conoce a la perfección. Quizás atraído por su parecido con las obras artísticas que la Naturaleza pone diariamente frente a sus ojos en el intrincado universo molecular de la materia, Shechtman asegura que puede reproducir los detalles de las paredes de la Alhambra en el fondo de sus párpados cerrados.

Imaginemos que queremos cubrir una pared con mosaicos. Es evidente que podemos utilizar

azulejos cuadrados o rectangulares, pero también es posible cubrirla con piezas hexagonales. De hecho, así es como hacen las abejas sus panales. Un hexágono puede ser dividido en triángulos, de modo que también podríamos utilizar estos últimos. Sin embargo, si tuviéramos la peregrina idea de utilizar mosaicos pentagonales, no nos llevaría mucho tiempo comprobar que se trata de una empresa inviable. No es posible cubrir con ellos una pared. Johannes Kepler ya había explorado esta posibilidad en 1619, llegando a la conclusión de que los inevitables huecos que dejaban los mosaicos pentagonales adoptaban formas interesantes como, por ejemplo, estrellas de cinco puntas como las que dibujan los niños. Tampoco es posible cubrir una superficie plana con mosaicos de siete o más lados.

Si ahora observamos los motivos pictóricos de cada uno de los azulejos de la Alhambra, notaremos que el criterio estético seguido por los artistas musulmanes buscaba representar un patrón complejo, pero ordenado. La distribución simétrica de formas y colores produce una sensación armónica en nuestro cerebro, un raro bienestar que nos conmueve al que asociamos con la belleza. Figuras que se repiten, patrones especulares, representaciones que al ser giradas vuelven a su disposición original. Todas estas regularidades nos resultan agradables. Llevan consigo el encanto y el esplendor, la perfección de la simetría.

Belleza y simetría: el lunar de Marilyn

Los elementos básicos de la simetría son operaciones espaciales que dejan invariante al objeto sobre el que actúan. Por ejemplo, las rotaciones o la reflexión especular. La estrella de David, símbolo de los judíos, resulta inalterable si se la rota 60 grados. La cruz cristiana, en cambio, quedará inmutable si intercambiamos sus lados derecho e izquierdo respecto de una imaginaria línea vertical que pase por su eje central. No es casual la elección de objetos simétricos, dotados de una propiedad asociada a la belleza y a la perfección, como símbolos religiosos. Un rostro bello es, ante todo, simétrico. Ligeras asimetrías, sin embargo, como el mítico lunar que lucía Marilyn Monroe en su mejilla izquierda, pueden ser muy atractivas y un ejemplo de la complejidad del sentido estético humano.

Otra simetría importante está dada por las traslaciones: un patrón que se repite a intervalos regulares suele ser placentero. Lo que resulta particularmente incuestionable en una distribución temporal y está en la raíz de la existencia y relevancia del ritmo en la música. Menos evidente que las operaciones de simetría anteriores resulta la reflexión seguida de un deslizamiento a lo largo del plano de reflexión. Como en cualquier pared de ladrillos o en la inquietante obra *Caballeros* de Maurits Cornelis Escher.

Las traslaciones, rotaciones, reflexiones especulares y reflexiones desplazadas son los ingredientes básicos que nos permiten clasificar los distintos tipos de simetría de un mosaico plano. ¿Cuántas posibilidades distintas existen? ¡Exactamente diecisiete! Ni una más, ni una menos. Así lo demostró el matemático ruso Evgraf Stepanovich Fedorov en 1891. Más sorprendente es el hecho de que los artistas medievales de al-Ándalus, varios siglos antes, fueran capaces de plasmar estas diecisiete posibilidades en los majestuosos mosaicos de la Alhambra. Esos que Dan Shechtman puede reproducir de memoria.

Mosaicos de la Naturaleza: los cristales

A la mayoría de los que se sumergen en el esfuerzo intelectual de intentar entender las leyes de la Naturaleza, éstas les suelen resultar tremendamente bellas. Sencillas, simétricas, elegantes. Una Naturaleza dotada de tan buen gusto no podría privarse de la ocasión de realizar por sí misma una obra que le vaya a la par a los mosaicos de la Alhambra. Es capaz, de hecho, de ir un paso más allá y producir mosaicos tridimensionales. Se trata de los materiales sólidos a los que llamamos cristales. En ellos, los átomos se disponen espacialmente en una red compacta y ordenada. Estas estructuras tridimensionales poseen simetrías que permiten explicar muchas de sus propiedades, tales como su dureza, transparencia, su predisposición a conducir el calor o la electricidad.

Un ejemplo familiar es la sal de mesa, o cloruro de sodio. Este es un cristal en el que los átomos se

ordenan en una red cúbica, intercalándose un átomo de cloro y otro de sodio en cada fila, mientras la fila de al lado es exactamente igual, pero desplazada una posición, de modo que frente a cada átomo de sodio, en todas las direcciones espaciales, hay uno de cloro.

Al igual que con los diecisiete embaldosados periódicos del plano, esta disposición de los átomos se repite en las distintas orientaciones espaciales, hasta distancias que resultan prácticamente infinitas en la escala atómica. Podemos recurrir nuevamente a la matemática y clasificar los cristales según las simetrías que poseen. En este caso el número de posibilidades es mayor. Existen treinta y dos grupos de simetría cristalográficos. Tras décadas de exploración, se fueron encontrando materiales que se ajustaban a cada uno de ellos, dejando en evidencia que la Naturaleza también es una artista ambiciosa que agota las posibilidades que le ofrece la paleta de sus leyes.

Ningún cristal podía quedar afuera de este abundante pero selecto catálogo. Ninguno. Esta verdad inconmovible se desmoronó con estrépito la mañana en la que a Dan Shechtman se le ocurrió enfriar rápidamente una aleación de manganeso y aluminio.

Don Quijote de la Alhambra

No parece necesario insistir demasiado sobre la singularidad de Roger Penrose. Su insaciable curiosidad geométrica le llevó a apretar las tuercas de muchas verdades incuestionables que acabaron crujiendo y cediendo ante la agudeza de su ingenio. Una de ellas fue la de la completitud del catálogo de mosaicos de la Alhambra. Si bien Penrose comprendía que las conclusiones de un teorema son inexorables, su intuición le decía que el restringir nuestra atención a los diecisiete tipos de embaldosados periódicos podía resultar en la pérdida de muchas y hermosas posibilidades. Quizás eliminando alguna de las restricciones impuestas a los *teselados* (denominación habitual de la cobertura total del plano con un conjunto determinado de baldosas) podríamos obtener resultados interesantes.

¿Era realmente necesario pedir que los patrones se repitieran infinitamente en todas las direcciones? Tal vez fuera posible dejar de lado el *mantra* subyugante de la simetría de traslaciones y considerar un mosaico infinito, construido con un grupo bien determinado de azulejos, pero que nunca repitiera sus patrones. Un *teselado aperiódico*. En un trabajo publicado en 1974 —que, como descubrió más adelante, resolvía un antiguo problema ya planteado en una ilustración del libro *Harmonices Mundi* de Kepler—, Roger Penrose demostró que era posible embaldosar el plano infinito, basado en pentágonos y utilizando seis tipos de baldosas. A pesar de que los teselados de Penrose no tienen la simetría de las disposiciones periódicas, uno

puede observar ciertas regularidades. Por ejemplo, tienen un punto en torno al cual podemos rotar de modo que una región cercana al eje de rotación no se modifique. Esta simetría es pentagonal, tabú absoluto en el contexto de los embaldosados periódicos.

Cuando Roger Penrose encontró en el universo de la abstracción geométrica estas nuevas estructuras, se preguntó si las leyes de la Naturaleza podrían hacer uso de esta fuente de belleza y se respondió negativamente. ¿Por qué? Al no ser periódicos, los teselados de Penrose son *no-locales*: su estructura está rígidamente determinada por lo que acontece en torno al punto de simetría pentagonal por mucho que nos alejemos de él, algo que parece muy difícil de replicar en el mundo natural. ¿Cómo podría hacer la Naturaleza para producir estructuras extendidas en las que dos partes arbitrariamente alejadas entre sí tuvieran que saber la una de la otra?

El descubrimiento de Shechtman

Al enfriar bruscamente la aleación metálica, Shechtman esperaba haber creado un completo desorden en su estructura cristalina. El patrón resultante de la difracción electrónica, sin embargo, correspondía a un orden atómico perfecto, salvo por un hecho perturbador. Rotando las placas fotográficas 72 grados, un quinto de vuelta, los puntos brillantes volvían a su posición inicial. ¡Un patrón

ordenado con simetría pentagonal! Dan Shechtman encontró azarosamente, sin buscarlo, el mecanismo que la Naturaleza había reservado para hacer realidad la geometría de Penrose.

Cuando se convenció de que el resultado no se debía a la superposición de dos cristales, anunció en el laboratorio el descubrimiento de *cuasicristales*. El rechazo que provocó fue tal que a la mañana siguiente se encontró con un sarcástico regalo: el manual cristalográfico de uso común en todos los laboratorios del mundo con un *post-it*: «Léelo». Era el jefe de su laboratorio. Él le respondió que no necesitaba leerlo, que enseñaba todo eso en el Technion, y que sabía perfectamente que lo que había encontrado no estaba allí. Días después fue expulsado del laboratorio por ser considerado una deshonra para el grupo. El dos veces premio Nobel Linus Pauling llegó a declarar con hiriente ironía, «no existen los cuasicristales, sólo existen los cuasicientíficos».

Pero la abnegada determinación de Shechtman es un poderoso ejemplo de pasión por la ciencia. Refugiado en una ciudad amurallada, la Alhambra de su voluntad e intelecto, siguió luchando por sus ideas en contra de los más prestigiosos científicos de la época. Se sintió reforzado al ver llegar en su ayuda al hidalgo caballero inglés, en cuyos escritos descubrió que estructuras como la que había observado poseían atributos que las hacían dignas merecedoras de ser parte del catálogo de maravillas de este mundo. Así se lo hizo saber en una

carta, a la que Penrose respondió expresando su admiración por el hallazgo, pero sin ocultar su sorpresa por el hecho de que la *no-localidad* de los cuasicristales no hubiera representado una barrera infranqueable para la Naturaleza.

Hasta que llegó el añorado instante en el que otros laboratorios del mundo terminaron por darle la razón. La *shechtmanita*, como bautizaron inicialmente al controvertido *cristal*, era una realidad en nuestro Universo. Que lo hace más hermoso, más complejo. En la actualidad ya se conocen en torno a un centenar de cuasicristales diferentes, evidenciando una vez más que en el imperio de los grandes principios, las grandes ideas, lo diverso suele prevalecer sobre lo singular. Un Universo elegante como el nuestro no malgasta ideas hermosas en producir una pieza única. Los tributos humanos a la Naturaleza o a sus deidades, como la Alhambra, jamás podrán competir con los prodigios que la propia Naturaleza parece reservar para el hombre. Como estos mosaicos tridimensionales que tuvieron que esperar casi 14 mil millones de años para que un tal Dan Shechtman pudiese experimentar el placer y la pasión de observarlos.

CLAPTON Y LA GUITARRA ELÉCTRICA

Quince mil pares de ojos esperaban ansiosamente el momento en el que su inconfundible silueta se dibujaría sobre el escenario. La primavera era un hecho incontestable en la cálida atmósfera de la noche porteña. La espera había sido larga. Pasados quince minutos de las ocho, cuando los músicos ya estaban en sus puestos, se produjo la anhelada aparición. La *Fender Stratocaster* celeste colgaba sobre su cuello mientras caminaba con paso seguro, afirmando la yema de los dedos de su mano derecha en la púa. Sin que mediara palabra alguna, hundió con su dedo medio la cuarta cuerda a la altura del séptimo traste, afirmando con el resto de la mano el puente de su guitarra.

La cuerda pulsada vibró exactamente doscientas veinte veces en el transcurso de un segundo. Esperó a que los amplificadores le devolvieran ese primer *LA* que, como un lamento, acalló el ruido mudo de los aplausos. Frente a la evidencia de una

afinación perfecta, los músicos enfocaron sus sentidos en el imperceptible gesto que tendría lugar bajo la montura de sus anteojos negros, indicando el inicio del primer compás de *A key to the highway*. En ese preciso instante, como de costumbre, Eric Patrick Clapton volvió a recordar los días de su infancia en el condado de Surrey, a pocos kilómetros de distancia de la casa natal del padrino secreto de su carrera artística: la guitarra eléctrica no existiría de no haber sido por el descubrimiento del fenómeno de inducción magnética que Michael Faraday realizara hacía 180 años.

Dos jóvenes británicos

Faraday nació hace más de dos siglos, a treinta kilómetros de la futura casa de los Clapton. La pobreza de su familia le obligó a trabajar desde muy joven, por lo que jamás recibió una educación formal. Su encuentro fortuito con la ciencia ocurrió cuando, a los 14 años de edad, fue contratado por George Riebau, encuadernador y librero londinense. Él le dio al joven Michael la posibilidad de entrar en el universo de la ciencia permitiéndole leer los muchos libros que atesoraba y encuadernaba. Faraday estaría toda la vida agradecido a este hombre que dio inicio a su meteórica carrera autodidacta, la que le llevó de los bajos suburbios londinenses a transformarse en el científico mas respetado de su tiempo.

Una gratitud similar probablemente tenga Eric Clapton para con sus abuelos, quienes no sólo cuidaron de él toda su infancia. Le regalaron, además, su primera guitarra eléctrica cuando cumplió los 13 años. Era una *Hoyer* alemana de cuerdas metálicas. Una guitarra barata y difícil de tocar, que llego a poner en jaque su vocación, aunque acabó por rendirse a la tenacidad que avivaba su talento. Emulando a su coterráneo, que a esa misma edad leía sobre los misterios de la química en la soledad de una bodega de *Blandford Street*, Eric pasaba horas escuchando y ensayando temas de Muddy Waters. Sólo el dolor de sus dedos ensangrentados le obligaban a hacer una pausa en su impetuosa voracidad por dominar todos los secretos del instrumento.

George Riebau consiguió, a través de uno de sus clientes, que Faraday pudiese asistir a los 20 años a las clases que el renombrado químico Humphry Davy ofrecía en la *Royal Institution*. Al final del curso Faraday le envió a Davy un libro basado en los apuntes que prolijamente había tomado durante cada una de sus clases. La impresión que provocó en el químico fue tan honda que no dudó en contratarlo como asistente de su laboratorio. Eric Clapton, por su parte, fue reclutado a los 18 años por los *Yardbirds*. Corría el año 1963 cuando su talento fue advertido por Keith Relf, líder de la banda. El despegue de ambos veinteañeros británicos fue imparable a partir de ese momento.

La inducción electromagnética

Michael Faraday estaba interesado en la relación entre dos fenómenos que parecían de naturaleza distinta: la electricidad y el magnetismo. Ambos fueron observados por los griegos unos dos mil quinientos años atrás. La primera parecía deberse a la presencia de pequeñas cargas que podían ser arrancadas de ciertos materiales y obligadas a moverse en el seno de otros. El segundo, en cambio, parecía un fenómeno propio de algunas piedras que actuaban como imanes naturales y que conseguían el prodigio de atraer algunos metales. El propio planeta Tierra es un imán gigante y la brújula es el instrumento con el que podemos verificarlo, al tiempo que podemos hacer uso de este fenómeno para orientarnos sobre su superficie.

En 1820, el físico danés Hans Christian Ørsted notó que la corriente eléctrica que se desplazaba a través de un cable, desviaba la aguja de una brújula cercana. La corriente eléctrica, concluyó, producía magnetismo. Un año más tarde Faraday diseñó un ingenioso experimento en el que se combinaba el magnetismo producido por una corriente con el de un imán permanente, de modo que las fuerzas magnéticas provocaran la rotación de un pequeño objeto que flotaba sobre mercurio. Lejos de estar interesado en las aplicaciones del artilugio, su genio intelectual y creativo encontraba la fuente de su motivación en la simple curiosidad y la búsqueda de la belleza. De este modo desprendido y romántico, Faraday había construido el primer motor eléctrico de la historia.

Pero si una corriente eléctrica podía producir magnetismo, ¿no era quizás posible generar electricidad utilizando imanes? Una serie de célebres experimentos realizados por Faraday en 1831 mostraron que la respuesta era afirmativa. En pocas palabras la situación es la siguiente. Imaginemos un alambre circular de cobre cuyos extremos están conectados a, digamos, una pequeña lámpara (cuyo encendido nos revelaría la presencia de una corriente circulando por el cable). Si acercamos un imán, podremos comprobar que la bombilla se enciende mientras el imán se aproxima o se aleja, pero se apaga apenas éste deja de moverse. Lo que sucede es que desde el imán emanan invisibles líneas de *campo magnético*. Al moverlo, la cantidad de líneas que atraviesan el círculo de cobre varía, lo que genera una corriente eléctrica a lo largo de éste.

El gran descubrimiento de Faraday fue que la electricidad no es inducida por la presencia del imán y sus líneas de campo, sino por la tasa de cambio en el número de éstas que atraviesan el circuito. Según éste aumente o disminuya, la corriente eléctrica circulará en una u otra dirección. Faraday fue, de este modo, el primero en advertir que era posible transformar energía de movimiento en energía eléctrica. Los generadores que transforman el movimiento —del viento, del agua o del vapor

de agua que podemos generar con la combustión del carbón— en electricidad no tardaron en llegar. Y la electricidad fue posible en cada casa. Y las ciudades se iluminaron. Y se encendieron las luces que alumbran el escenario y los altavoces que dejan escuchar, aún a los espectadores más alejados, la quejumbrosa voz de Clapton cuando canta «... and then I tell her/as I turn on the light/I say my darling, you were wonderful tonight». Quizás para Faraday la belleza de la mujer descrita en estos versos se vería ensombrecida por la del simple y a la vez fascinante hecho del protagonista encendiendo la luz. «Nada es demasiado hermoso para ser cierto si es consistente con las leyes de la naturaleza», pensaba y escribía.

El valor económico de la tecnología desarrollada a partir de los trabajos de Michael Faraday es incalculable. Su influencia en la vida y el bienestar de todos los seres humanos, sobrecogedora. Cuenta el historiador irlandés William Lecky, contemporáneo de Faraday, que el ministro de finanzas británico de la época, William Gladstone, le preguntó por la utilidad de su descubrimiento: «No lo sé, *sir*, pero es probable que pronto pueda usted cobrar impuestos por él». Es oportuno enfatizar que todo esto fue producto de la curiosidad fecunda y persistente que sólo el vértigo de la investigación básica puede espolear. En lugar de apresurarse a convertir su extraordinario ingenio en dinero, Faraday siguió trabajando y, sin proponérselo, cambiando para siempre la vida del género humano.

La guitarra eléctrica

Cuando la púa pulsó la cuarta cuerda al tiempo que el dedo de Clapton la presionaba en su séptimo traste, el experimento de Faraday se hizo presente sobre el escenario. De hecho, el concierto no fue más que una repetición incesante de la experiencia de inducción electromagnética, y el sonido perfecto de la guitarra una prueba irrefutable de la validez de la ley de Faraday. La *Fender Stratocaster* tiene adosadas a su cuerpo tres cápsulas en las que la vibración de las cuerdas es capturada para luego transformarse en sonido. Éstas consisten en un conjunto de seis pequeños imanes cilíndricos, ubicados bajo cada una de las cuerdas, con un pequeño cable de cobre enrollado en varias espiras. Las cuerdas de la guitarra eléctrica son de acero, material que exhibe una propiedad conocida como *ferromagnetismo*.

Los materiales ferromagnéticos pueden pensarse como un conjunto enorme de imanes microscópicos pero cuyos polos están orientados en direcciones aleatorias, por lo que no generan un campo magnético que podamos observar. Sin embargo, cuando un imán se les acerca, todos se alinean a lo largo de sus líneas de campo, del mismo modo en que la aguja de la brújula se orienta en la dirección del campo magnético terrestre. El

repentino ordenamiento de los minúsculos imanes produce un efecto neto, colectivo, en el que su magnetismo se suma y el material se transforma en un imán. Decimos que se *imanta*. Esta propiedad, que se puede verificar en casa con pequeños *clips* de manera sencilla, es la misma que experimenta el acero de la cuarta cuerda, que ahora vibra sobre las cápsulas de la *Stratocaster*.

La oscilación de la cuerda imantada provoca que el campo magnético que atraviesa las espiras de cobre varíe con la misma frecuencia. Aquí entra Faraday para recordarnos que se generará una pequeña corriente eléctrica en estos cables de cobre, y que ésta tendrá, inexorablemente, la misma frecuencia que la cuerda. Se llevará consigo esa información directo al amplificador, que aumentará su energía de modo de ser capaz de mover el diafragma de unos altavoces que repartirán el cálido *LA* que Eric Clapton acaba de tocar, haciéndolo audible a las casi treinta mil orejas que aguardan expectantes.

Faraday y Clapton compartirán 105 minutos juntos en el escenario. El concierto llegará a su fin con la significativa interpretación de *Crossroads*, haciendo evidente el hecho de que sus historias, si bien separadas por casi dos siglos, no sólo tienen en común la perseverancia de dos jóvenes ingleses autodidactas y talentosos que llegaron a la cúspide de sus disciplinas. Es más que eso. Un dueto conformado por dos amantes de la belleza más pura y

sin propósito. Dos gigantes. Los dos están allí. Tocando en el escenario para toda esa gente que grita y canta, anestesiada por esa sonoridad mágica. Ese sonido que es un destilado de lo más grande y profundo que la ciencia, la tenacidad, la creatividad y la humana alegría nos pueden ofrecer.

UN TAL LUCAS

Pocos científicos tuvieron el reconocimiento de la sociedad de su época como el que disfruta en la actualidad Stephen Hawking. Cuando se glosa su vida se empieza invariablemente por subrayar que ha sido titular de la *Cátedra Lucasiana*. Ésa que alguna vez fuera ocupada ni más ni menos que por Isaac Newton. Cuando hace pocos años debió jubilarse, la Universidad de Cambridge se enfrentó a la traumática tarea de buscar candidatos que estuvieran a la altura de recoger el testigo. ¿Cómo reemplazar a quien en virtud de su renombre universal ya se había convertido en sinónimo de esta cátedra? No fue ésta la primera vez que los académicos de Cambridge se enfrentaron a una encrucijada semejante.

La Cátedra Lucasiana

La historia de este magisterio se inició en diciembre de 1663 a partir de una donación del reverendo Henry Lucas, ex-miembro de la Cámara

de los Comunes en representación de la Universidad de Cambridge. En su testamento, entre otras donaciones orientadas a gente de pocos recursos, el reverendo Lucas dejó su colección de 4.000 libros (que incluía un polémico ejemplar escrito por un contemporáneo suyo, un tal Galileo Galilei) a la biblioteca de la universidad, al tiempo que legó unas tierras cuyo usufructo, estimado en unas cien libras esterlinas anuales, debía utilizarse para financiar una cátedra en matemática. ¡Tan antigua es la costumbre anglosajona de incluir a las universidades entre sus herederos, como lo es el hábito latino de hacer lo propio con las iglesias!

Curiosamente, la matemática estaba lejos de ser una disciplina en la que Cambridge destacara en aquellos tiempos. La tradición de la universidad en matemática era poco menos que irrelevante. El legado del reverendo Lucas resultó providencial. Un centenar de libras anuales fueron el acicate que prohijó una gesta intelectual superlativa. Difícilmente haya habido en la historia de la humanidad, antes o después, una inversión tan rentable.

El primer titular de la Cátedra Lucasiana fue el londinense Isaac Barrow. Tenía los conocimientos teológicos habituales en el mundo académico del siglo XVII, y saberes de física y matemática más acordes con los tiempos que empezaban a gestarse a partir de Copérnico, Giordano Bruno y, sobre todo, Galileo. En un período políticamente turbulento tras la ejecución del rey Carlos I y la república de Cromwell, tiempos de fuerte enfrentamiento entre las iglesias anglicana y católica, Barrow tuvo una vida bastante agitada, debiendo pasar largos períodos en el extranjero y siendo forzado a revalidar su lealtad a la iglesia anglicana bajo la amenaza de sanciones.

No deja de ser significativo que su contrato con el *Trinity College* fuera como profesor de griego. El conocimiento matemático de la época, de hecho, se nutría fundamentalmente de los clásicos griegos. Así, Barrow debió aprender griego antiguo para leer a Euclides y lo tradujo para poder utilizarlo como libro de texto. Sus clases como profesor Lucasiano, sobre todo en óptica y geometría, tenían un éxito enorme entre los estudiantes que se asomaban a los nuevos tiempos abiertos por Galileo. Barrow, sin embargo, se esforzaba por hacer manifiesta su preferencia por la teología. No es difícil conjeturar que actuara bajo la certeza de que sus movimientos eran rigurosamente vigilados siendo, como era, el frágil puente entre una doctrina milenaria que se derrumbaba y la naciente modernidad.

Regio entierro de un profesor de matemática

Si bien Barrow tenía una sólida reputación intelectual y se lo consideraba un excelente comienzo para la cátedra, ni el más optimista podía imaginar lo que sucedería con su heredero. En 1669, cuando renunció para dedicarse de lleno a la teología, se

decidió nombrar a un joven de 26 años que le había ayudado con sus manuscritos. Nacido en Lincolnshire, un condado del este de Inglaterra (en el que tres siglos más tarde nacería alguien de mucho menos genio pero carácter igualmente irascible, Margaret Thatcher), Isaac Newton ya había dado muestras de su talento con un trabajo inédito en el que sentaba las bases del cálculo diferencial. Barrow leyó ese manuscrito y no dudó en calificar a su autor como un genio. Se apresuró a presentar su renuncia a la cátedra tras considerar que ya había encontrado a un digno heredero.

Newton produjo una revolución en el campo de la física, coronada por la publicación, en 1687, de los tres volúmenes de *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, en los que estableció las leyes del movimiento y de la gravitación universal. El mero hecho de que estas leyes no distinguieran entre una manzana, un planeta o un ser humano, que dependieran de una propiedad (la inercia) que todos ellos tienen, acabó de echar por tierra todas las nociones jerárquicas y antropocéntricas anteriores a Galileo.

La autoridad intelectual de Newton se impuso durante más de dos siglos. Su fama alcanzó cotas impensadas para el mundo del siglo XVII, en el que la información no fluía como lo hace actualmente. Voltaire, exiliado dos años en Inglaterra por los problemas que le generaba su filosa lengua, fue testigo de los honores que se le rindieron en su funeral:

«He visto a un profesor de matemática, sólo porque era grande en su vocación, enterrado como un rey que había hecho el bien a sus súbditos». Paradójicamente, tras la violenta controversia que Newton mantuvo con Leibniz acerca de la paternidad del cálculo diferencial, la comunidad matemática inglesa, que cerró filas en torno a su principal exponente, se vio arrastrada a un período de oscuridad que duró prácticamente un siglo y medio.

La cátedra que ocupó Newton

La cátedra que Newton asumió como una distinción sin mayor valor histórico, adquirió tras los 32 años de su paso por ella un prestigio legendario. Luego de un período como director de la Casa de la Moneda, Newton consideró que era hora de nombrar un sucesor y propuso para el cargo a William Whiston, un discípulo suyo. Éste pasó con más pena que gloria y no sólo por el contraste con su mentor. Fue acusado de hereje por las autoridades de Cambridge y forzado a abandonar la institución en 1710. Su contribución más conocida fue el estudio de la física de los cometas, al mismo tiempo que su colega de Oxford, Edmund Halley. Su obsesión por los cometas le llevó a intentar explicar con ellos el diluvio universal y la Creación... Newton no dudó en quitarle su apoyo.

Tras el tumultuoso período de Whiston, aún bajo la vigilancia de Newton, se buscó a un prestigioso académico que pudiera traer algo de sosiego.

El candidato ideal era Nicolas Saunderson, ciego desde que tenía un año de edad. Con enormes dificultades se había procurado una formación académica abrumadora pero sin poder alcanzar un título universitario. Para no generar un delicado precedente, las autoridades de Cambridge consiguieron que la reina Ana le concediera el título de *Maestro de las Artes* y procedieron a nombrarlo en la Cátedra Lucasiana, en la que se mantuvo 28 años. Así se fue asentando la costumbre de buscar candidatos jóvenes que convirtieran al círculo Lucasiano en un grupo de élite al que se incorporan no más de cuatro o cinco personas por siglo.

La noche en la que cayó la matemática británica después de Newton restó brillantez a la Cátedra Lucasiana hasta mediados del siglo XIX. Si bien siguió estando en manos de académicos de prestigio, George Airy apenas permaneció un par de años y Charles Babbage no residía en Cambridge. Ni siquiera impartió cursos en la universidad, requisito insoslayable según el designio de Lucas. El nombramiento de George Stokes en 1849, un experto en física de fluidos que se mantuvo más de medio siglo como Lucasiano, le devolvió el brillo de sus inicios y marcó el final definitivo del prolongado trauma académico que representó la omnipresente autoridad de Newton.

La trinidad Lucasiana

En 1903 fue nombrado Joseph Larmor, uno de los precursores del descubrimiento del electrón y

de sus propiedades fundamentales. El instante más parecido a aquél mágico momento en el que Barrow dio paso a Newton se dio en 1932. Larmor decidió retirarse a su añorada Irlanda y nadie tuvo dudas sobre quién debía ser su sucesor: un joven que acababa de cumplir los 30 años y ya era una leyenda. Paul Dirac aceptó la distinción justo a tiempo para, al año siguiente, desplazarse a Estocolmo a recibir el premio Nobel de física junto a Erwin Schrödinger. Se pueden decir muchas cosas sobre Dirac para destacar su relevancia. Curiosamente, una de las más contundentes ha resultado ser, con el correr de los años, que su apellido se haya integrado a la fórmula coloquial que define a la Cátedra Lucasiana: *la que tuvieron Newton y Dirac*. Entre ellos, una docena de lumbreras que pese a sus enormes contribuciones a la ciencia no llegaron a dejar la impronta de su nombre en el imaginario académico.

Dirac dejó la Cátedra Lucasiana al cumplir los 67 años, según la tradición que habría de imponerse, y se fue a Estados Unidos a pasar el final de su vida. Lo sucedió James Lighthill, un matemático con múltiples intereses en campos tan dispares como la aerodinámica, la hidrodinámica y la acústica, que se interesó directamente por las misiones de vuelos tripulados de la NASA y por la puesta en órbita de satélites. Tal como sucediera con Whiston, el contraste con su predecesor resultaba insoportable. Quizás por ello resignó su

puesto en cuanto apareció en escena un candidato óptimo, un joven que al igual que el sucesor de Whiston poseía una característica física especial. A Stephen Hawking se le había diagnosticado desde los inicios de su carrera una esclerosis lateral amiotrófica, enfermedad neurodegenerativa que progresivamente lo fue paralizando.

En contra de los pronósticos médicos, Hawking prolongó su magisterio hasta la jubilación, realizando contribuciones sustanciales en el área de la gravitación. Una buena parte de lo que sabemos sobre los agujeros negros ha sido el resultado de sus trabajos, que son referencia obligada en cualquier artículo científico que gire en torno al origen del Universo o los agujeros negros. Sin descuidar sus investigaciones y clases, Hawking decidió enfocar el último tercio de su vida académica en la divulgación científica, con un éxito apabullante que contribuyó a darle una notoriedad pública sin precedentes en la historia de la ciencia.

Después de Hawking

En septiembre de 2009, al cumplir la preceptiva edad de jubilación, Stephen Hawking dejó la Cátedra Lucasiana. Por tercera vez Cambridge se veía ante la ingente tarea de buscar un sucesor de fuste. Los rumores se dispararon, barajando por primera vez nombres ajenos a la comunidad británica. La tradición, sin embargo, es un valor seguro al que apostar en el universo de las grandes instituciones

del Reino Unido: la elección recayó en Michael Green, uno de los padres de la moderna Teoría de Cuerdas cuya oficina estaba a pocos metros de la del propio Hawking. No obstante, tras las traumáticas sucesiones de Newton y Dirac, Cambridge optó por mantener a Hawking en plantilla, concediéndole un novedoso puesto de *Lucasiano Emérito*.

El 22 de mayo de 2013, Green cumplió 67 años obligando a emprender nuevamente la búsqueda de un sucesor. En el momento en que estas líneas están siendo escritas, han transcurrido más de quince meses y aún no se conoce el nombre del decimonoveno Profesor Lucasiano de Matemática. ¿Habrá esta vez una mujer Lucasiana? ¿Alguien ajeno al mundillo académico anglosajón? La matemática iraní Maryam Mirzakhani, por ejemplo, o el brasileño Artur Avila, quienes acaban de recibir la *Medalla Fields*, reúnen todas las condiciones para personificar un refrescante golpe de timón que abriría un nuevo y apasionante capítulo en la historia de este magisterio. Cualquiera sea la persona elegida, pocas dudas caben de que llevará un tiempo recuperarse del trauma producido por la vacante de Hawking, para mantener el áureo brillo de la cátedra que hace 350 años tuvo la preclara generosidad de soñar un tal Lucas.

CRISIS DE INFORMACIÓN

«Los agujeros negros no existen», afirmó Stephen Hawking en una charla que impartió por videoconferencia en la Universidad de Santa Barbara en la mañana del 23 de agosto de 2013. La posterior aparición de un artículo suyo basado en dicha ponencia generó un barullo informativo considerable en los medios de comunicación masivos de todo el mundo. Pasadas unas semanas, sin embargo, sus ecos se disiparon. La información naufragó en el torrente de noticias que se disputan el protagonismo diario, para desaparecer poco después. Una ironía del destino tratándose del hombre que vaticinó hace cuatro décadas la pérdida inexorable de información debida a la mera existencia de los agujeros negros. Aquellos de los que ahora parece renegar en un breve artículo carente de ecuaciones y de tan fugaz interés informativo.

Perdiendo información

Veamos qué entendemos por información en física. Para esto consideremos un sistema relativamente simple y familiar como el formado por el Sol, la Tierra y la Luna. Supongamos que se nos permitiera alinearlos de modo que un espléndido eclipse de Sol tuviera lugar en el sitio y a la hora a la que usted lee estas líneas. Esta información quedará grabada en la futura evolución del sistema. En cualquier momento podríamos observar su estado y deducir la pretérita existencia de ese eclipse. De hecho, podemos determinar con precisión las fechas y lugares de todos los eclipses, tanto pasados como futuros. La información en este ejemplo, como vemos, no se pierde.

Pasemos a un sistema más complicado. Un vaso de agua en el que billones de billones de moléculas se mueven, colisionan y rotan sin descanso. Este tipo de sistema se estudia utilizando las técnicas de la mecánica estadística y la termodinámica. Aquí ya no nos interesa el estado de cada molécula, sino el comportamiento macroscópico del agua: su volumen, su presión, su temperatura. Cantidades asociadas a promedios de aquellas que describen a cada molécula. Así, aunque no sepamos el estado de una en particular, podemos conocer la probabilidad de que, por ejemplo, se desplace a cierta velocidad. No es que no podamos, en principio, tener toda la información del sistema. Es que el obtenerla es una empresa impracticable y, lo que es peor, irrelevante para la mayoría de las preguntas que podrían interesarnos. En mecánica estadística renunciamos al embotamiento por exceso de información para quedarnos con aquella que es relevante.

Tomemos ahora un frasco de tinta y un pincel. Con un trazo rápido escribamos el pin de la tarjeta de crédito sobre la superficie del agua. Los números tendrán una duración efímera. La tinta se difundirá por todo el volumen accesible y acabaremos con un vaso de agua coloreada. ¿Se ha perdido inexorablemente la información que hace unos instantes estaba impresa en la superficie? En la práctica sí. La imposibilidad de calcular el estado de cada molécula con precisión nos obliga a conformarnos con los promedios. Y en esta teoría de los promedios hay una cantidad que describe precisamente la inevitable perdida de información, la desaparición del orden a la que estamos condenados. Se trata de la entropía, que siempre aumenta homogeneizándolo todo. Borrando información como una gran cuchara que revuelve el Universo.

Una cuestión de principios

Somos conscientes de que nuestro ejemplo del número en el agua es extremo. Para guardar información preferimos medios más estables. Un papel. O la memoria de un ordenador. Pero sobre estos también opera la entropía. Los papeles y las memorias se degradan, se borran. Nada podemos

hacer para salvaguardar del devenir del tiempo la información grabada en cualquier medio material. De hecho, en el aumento inevitable de la entropía radica la propia noción del transcurso del tiempo.

Notemos, sin embargo, que a pesar de que en la práctica el aumento de la entropía es un obstáculo para nuestro afán de guardar información, *en principio* las noticias no son tan pesimistas. Si pudiésemos conocer con precisión el estado de cada molécula del vaso de agua, podríamos utilizar las leyes de la física para determinar su estado pasado y futuro. En particular, recopilando los datos correspondientes a los pigmentos disueltos podríamos recuperar el número que hace segundos habíamos trazado en la superficie. Tranquilizador, quizás, pero impracticable. La información está allí, no se ha ido, sólo que es difícil recuperarla.

Podemos invertir el problema. Queremos ahora destruir el papel que nos envió el banco con el *pin* de la tarjeta de crédito y para ello usamos una trituradora de papel. Está claro que, *a priori*, nada impide la reconstrucción del documento original si se dispone de suficiente paciencia. ¿Y si lo quemamos? Las leyes fundamentales de la física nos dicen que, por imposible que parezca, a partir del estado final de las cenizas, del humo y el sonido que acompañó a la combustión, y del efecto sobre cualquier objeto cercano que haya sido afectado por el calor emitido, sería posible determinar la secuencia de cifras que alguna vez estuvieron impresas.

Funes y la física cuántica

El universo microscópico vive en un estado de obstinada e íntima indeterminación. La Naturaleza es intrínsecamente probabilística a escala atómica y subatómica. Son las leyes de la física cuántica. Un electrón no puede determinar simultáneamente cuál es su energía y en qué instante de tiempo está teniendo lugar su existencia. Debemos, sin embargo, distinguir entre las probabilidades que surgen de este devaneo cuántico —fruto de una suerte de desconocimiento o conocimiento parcial que la Naturaleza tiene de sí misma— y aquellas derivadas de nuestra ignorancia como observadores.

Si sabemos de un sistema cuántico todo lo que nos permite su intrínseca irresolución, decimos que se encuentra en un estado puro. En cambio, si nuestra información es parcial e incompleta, como suele ocurrir en los sistemas macroscópicos, de muchas partículas, decimos que está en un estado mezcla.

Las leyes de la mecánica cuántica, verificadas por usted mismo cada vez que utiliza un dispositivo electrónico, aseguran de manera categórica y tajante que un estado puro no puede convertirse en un estado mezcla por la mera acción del paso del tiempo. De otro modo, si dicha conversión fuera posible, se perdería información. Como *Funes el memorioso* en la obra de Jorge Luis Borges, un sistema cuántico está condenado al recuerdo perfecto. No puede olvidar nada. Absolutamente nada.

Hay algo de paradójico en todo lo anterior. Las leyes más elementales de la física, aquellas que gobiernan el comportamiento de los constituyentes fundamentales de la materia, nos impiden la destrucción irreversible de la información. Vetan la existencia de trituradoras perfectas. Y sin embargo, a nivel macroscópico, lo que resulta imposible es salvaguardar la información de su inevitable deterioro. La termodinámica veta la existencia de memorias perfectas. ¿No es esto contradictorio? Lo que parece dejarnos a salvo de la paradoja, de un Funes que padezca el mal de Alzheimer, es que no parece posible que los sistemas físicos sean microscópicos y macroscópicos al mismo tiempo. ¿O es posible?

Agujeros negros: ¿trituradores o memoriosos?

La Mecánica Cuántica es uno de los dos pilares que sostienen a la física moderna. El otro es la Teoría de la Relatividad General, la que nos permite predecir los eclipses con total precisión. Los agujeros negros ofrecen el campo de batalla en el que ambas dirimen sus conflictos. El primero en hacerlo claro, con exquisita brillantez, fue el propio Hawking. Los agujeros negros son entes fascinantes. Tanto desde la perspectiva astrofísica como puramente teórica. Tenemos fuertes indicios de que todas las galaxias poseen en su centro un gigantesco agujero negro con una masa que va desde el millón hasta los mil millones de masas solares. Presumiblemente su colosal masa ha servido para cohesionar a las cien mil millones de estrellas que en promedio tiene una galaxia, de modo que se mantengan juntas en lugar de dispersarse por la inmensidad del cosmos.

Los agujeros negros son el estado final de muchas estrellas que al agotar el combustible nuclear que les da estabilidad, colapsan, cayendo sobre sí mismas por los efectos de la gravedad hasta terminar transformadas en objetos infinitamente pequeños, de densidad infinita. Es lo que en física llamamos una *singularidad*. Alrededor de ésta se forma un *horizonte de eventos*, una superficie imaginaria con la curiosa propiedad de que si algo la traspasa con rumbo hacia la singularidad, no podrá salir jamás. Ni siquiera la luz. De allí la negrura.

En agosto de 1975 Stephen Hawking mostró una propiedad asombrosa de los agujeros negros. Estudiando las propiedades cuánticas del vacío en las inmediaciones del horizonte de eventos, demostró que éstos emiten luz y otras partículas elementales, como si tuvieran temperatura. La forma en la que la energía está distribuida entre las partículas emitidas por el agujero negro resulta ser la de un objeto caliente, idéntica a la que observamos entre las partículas que componen el vaso de agua de nuestro ejemplo anterior.

Los cálculos que el propio Stephen Hawking realizó indican que un agujero negro con la masa del Sol está a 0.06 millonésimas de grado sobre el cero absoluto, y a mayor masa menor temperatura.

Esto hace virtualmente imposible la detección de la radiación térmica de los agujeros negros, teniendo en cuenta que el gélido espacio exterior está mucho más caliente. Sin embargo, la radiación de Hawking debe existir. Un suave fulgor invisible que acompaña su lenta evaporación, hasta la total desaparición.

Hawking en su laberinto

En su célebre artículo de agosto de 1975, *Ruptura de la predictibilidad en el colapso gravitacional*, Hawking se dio cuenta de que los agujeros negros serían capaces de destruir la información más elemental que podamos concebir, en contradicción frontal con los principios básicos de la Mecánica Cuántica. Podrían proporcionar una forma de eliminar la información para siempre. Tanto que ni siquiera *en principio* pudiésemos recuperarla. No se trataría de una imposibilidad práctica sino de un límite infranqueable impuesto por la teoría. La trituradora de documentos perfecta y final. Pero esto constituye, en sí mismo, una paradoja.

Si un agujero negro se creara a partir de un estado puro, las leyes del universo cuántico nos dicen que estará siempre en un estado puro. Sin embargo, la radiación de Hawking es de naturaleza termal. Como la que emite un carbón caliente en la parrilla. Cuando el agujero negro se haya evaporado nos legará una colección de partículas y luz propias de un objeto caliente, totalmente inespecíficas. La radiación térmica es la huella dactilar de

un proceso en el que se ha perdido información. Es el equivalente del agua coloreada. De otro modo, si lanzamos el papel del banco con el pin de la tarjeta de crédito dentro de un agujero negro, no podremos reconstruirlo. Ni siquiera *en principio*. Esto es, ni con toda la paciencia ni disponiendo de todos los medios para capturar información que poseamos. En las ingeniosas y divertidas palabras del propio Hawking, «no sólo Dios juega a los dados, sino que a veces nos confunde tirándolos en lugares en los que no podrán ser vistos jamás».

Si la argumentación fuera correcta, la pérdida de información en los agujeros negros marcaría el crujido de los cimientos que sostienen a la física cuántica. Deberíamos interpretar que desde el fondo de sus fauces estos monstruos del cosmos nos dicen con voz ronca que la Mecánica Cuántica es incorrecta. Si, en cambio, la argumentación resultara errónea... lo cierto es que ¡nadie sabe muy bien, tras cuarenta años, como corregirla! Cientos de propuestas, de ideas descabelladas, olvidadas, retomadas, descartadas... Si se insiste demasiado en contentar a la Mecánica Cuántica, en no contrariarla, los que crujen son los cimientos de la otra gran columna: la Teoría de la Relatividad General.

¿Son los agujeros negros trituradoras perfectas? ¿Vive *Funes el memorioso* en alguna esquina de los arrabales del universo cuántico? Cualquiera que sea la respuesta, la paradoja de la información de Hawking es y seguirá siendo uno de los grandes misterios de la física contemporánea.

EL ECLIPSE Y LA MARIPOSA

El domingo 8 de febrero de 2111 un eclipse de Sol adornará el cielo del salar de Maricunga, cerca de Copiapó, en el norte de Chile. La máxima oscuridad se espera para las 9 de la mañana con 1 minuto y 44 segundos. Conocemos las leyes de la gravedad, que nos permiten hacer estas asombrosas predicciones con la misma precisión con la que conocemos la física de las nubes y del viento. ¿Por qué, entonces, podemos obrar el prodigio de predecir un eclipse con 100 años de antelación y estamos nerviosos ante la posibilidad de que una lluvia imprevista nos agüe el asado del próximo domingo? Este importante acertijo fue resuelto de manera accidental hace medio siglo.

Edward Lorenz, matemático y meteorólogo norteamericano, trabajaba en su laboratorio del MIT intentando producir modelos que pudiesen explicar y predecir los fenómenos climáticos. Había decidido volcarse a la meteorología luego de ser reclutado durante la Segunda Guerra Mundial para

realizar pronósticos climáticos en el Cuerpo Aéreo del ejército de los Estados Unidos. Lorenz había elaborado un conjunto de ecuaciones que modelaban las distintas variables climáticas, tales como el viento, la temperatura y la presión. Resolverlas era una tarea compleja, pero que su rudimentario ordenador de tubos de vacío realizaba eficazmente. En un minuto podía simular el clima de un par de días, y los patrones que obtenía eran, frecuentemente, muy similares a aquellos que luego se observaban en la Naturaleza.

Una gélida mañana de enero de 1961, Lorenz decidió hacer algo que no había hecho nunca. Quiso estudiar con más detalle una secuencia climática entregada por su ordenador. Decidió repetirla, pero introdujo condiciones iniciales que diferían en forma ínfima de las originales. Su sorpresa fue mayúscula al comprobar que los patrones resultantes eran completamente distintos a los de la simulación anterior. La casi imperceptible diferencia inicial se amplificaba con el transcurso del tiempo, provocando cambios enormes en las predicciones. Inicialmente pensó que se trataba de un problema mecánico de su ingenio informático, pero a la larga comprendió que era una característica inherente del modelo.

Fue Lorenz quien acuñó el término *efecto mariposa* para referirse a esta propiedad, en una charla titulada: *¿Puede el batir de alas de una mariposa en Brasil causar un tornado en Texas?* Se refería a

que una pequeña perturbación, como la provocada por el aleteo de una mariposa, podría entrañar cambios sustanciales en la posterior evolución de la atmósfera. Este fenómeno, presente en buena parte de los modelos realistas de la naturaleza, es lo que llamamos *caos*. En la práctica, dado que todos nuestros instrumentos poseen un cierto grado de inexactitud, la aciaga consecuencia es que no podremos predecir casi nada a medio plazo, pues la imprecisión en nuestros datos iniciales se amplificará indefectiblemente.

La mañana del 8 de febrero de 2111 brindará un hermoso eclipse de Sol a quienes tengan la fortuna de visitar el salar de Maricunga. De eso estamos seguros. Lo que no podemos garantizar, independientemente de nuestros esfuerzos predictivos, es que no alce el vuelo por esos días una inoportuna mariposa en la mata atlántica brasileña y acabe interponiendo una nube que arruine irremediablemente el espectáculo.

LA ASIMÉTRICA VIDA DE EMMY

El domingo 14 de abril de 1935 una nube oscura de polvo cubrió los cielos de buena parte del centro de los Estados Unidos. Aún lo recuerdan como el *domingo negro*. En medio de la *Gran Depresión* y debido al pobre manejo del suelo y la sequía, grandes tormentas de polvo oscurecían la mañana de las grandes llanuras, transformándolo todo en un amasijo homogéneo e inhóspito.

A la misma hora, al este de allí, en Bryn Mawr, un pequeño pueblo de Pensilvania, una de las mentes más brillantes del siglo XX estaba a punto de apagarse. Tres días antes había sido operada de un tumor cervical y una complicación postoperatoria la estaba matando. Pocos recuerdan lo más negro de ese negro domingo. La muerte de Emmy Noether, una alemana que iluminó la matemática y la física del siglo XX, que hizo a estas dos disciplinas darse la mano al establecer el teorema matemático que más frutos ha entregado a la física. Un teorema hermoso, profundo, inesperado. Uno

que conectó dos cosas aparentemente inconexas: la simetría de los sistemas físicos con su comportamiento dinámico.

Ya hemos visto que la simetría, a grandes rasgos, es la propiedad que tiene algo de verse igual desde distintas perspectivas. Un vaso cilíndrico, por ejemplo, puede ser girado en torno a su *eje de simetría*, es decir, alrededor de la línea que pasa por su centro, sin que percibamos un cambio. Un cuadrado, por otra parte, puede ser girado en ángulo recto en torno a su centro y obtendremos idéntica figura. Nosotros mismos tenemos una simetría aproximada derecha-izquierda, de modo que la persona que vemos cuando nos miramos al espejo no resulta muy distinta de cómo nos vemos en realidad. Este tipo de simetría es típica también en palacios como el Taj Mahal o el de La Moneda en Santiago de Chile. Otro ejemplo que ya comentamos es el de un embaldosado infinito de piezas cuadradas e idénticas. Si saltamos de un punto de una baldosa al mismo punto de otra, quedaremos en una situación indistinguible de aquella de la que partimos.

Asociamos en ocasiones la simetría a la belleza. Esto no es siempre cierto. Un objeto poco simétrico se ve desordenado, desequilibrado. Si tiene mucha simetría, sin embargo, comienza a verse soso, repetitivo. La simetría, como el cilantro o la lamprea, es buena pero en su justa medida. De hecho, cerca del Big Bang, hace más de trece mil millones de

años, fue el momento en el que el Universo mostraba más simetría de toda su historia. Una sopa oscura y caliente. Homogénea y aburrida. Como el paisaje de las grandes llanuras en ese domingo negro que despidió a la gran Emmy.

Simetría y matemática

En la Universidad de Gotinga, Emmy Noether conocería a Hermann Weyl, uno de los matemáticos más influyentes del siglo XX. Weyl fue uno de los pioneros en el estudio de la simetría aplicada a la física. Formuló una de sus definiciones matemáticas más sencillas: un sistema cualquiera tiene una simetría si podemos hacer una operación sobre él, de modo que su estado final sea idéntico al inicial. Mientras más operaciones distintas podamos hacer, más simétrico será el objeto. Veamos algunos ejemplos. El más sencillo es aquel en el que sólo es posible realizar una operación, como es el caso de la simetría derecha-izquierda o de *reflexión* que comparte nuestro cuerpo con las fachadas del palacio de La Moneda o de la Catedral de Santiago de Compostela. La operación precisa es dividir el objeto mediante un plano de simetría (un plano imaginario que, en el caso de nuestro cuerpo, nos atraviese justo por la mitad) e intercambiar un lado con el otro. Si aplicamos una segunda reflexión volveremos al objeto inicial, sea éste simétrico o no, y es como si no hubiéramos hecho nada.

En el caso del cuadrado podemos realizar siete operaciones de simetría. Podemos rotarlo 90 grados en torno a un eje perpendicular que pasa por su centro, tanto en el sentido horario como antihorario. También podemos rotarlo 180 grados (los dos sentidos, en este caso, son equivalentes). Pero también podemos realizar cuatro reflexiones distintas e independientes: dos de ellas con respecto a rectas que, pasando por el centro, dividen al cuadrado en dos rectángulos idénticos, y otras dos respecto de rectas que pasan por un par de vértices no consecutivos. Es sencillo comprobar que si uno realiza dos de estas operaciones, consecutivamente, siempre se obtiene otra de las aquí descritas. Esto define lo que en matemática se conoce como un *grupo* y Weyl fue uno de los grandes autores que contribuyeron a construir la poderosa Teoría de Grupos.

En el caso del vaso cilíndrico hay infinitas simetrías. Podemos rotarlo en cualquier ángulo respecto de su eje de simetría y el vaso queda idéntico sobre la mesa (siempre que sea perfectamente liso y limpio). Una diferencia muy importante entre este último caso y los anteriores, es que la simetría de rotaciones del vaso es *continua*: el ángulo de rotación puede ser cualquier número real entre 0 y 360 grados. Son infinitos y no podemos ni siquiera numerarlos. En los ejemplos anteriores se habla de simetría *discreta* porque el número de operaciones es finito (también puede ser infinito pero numerable, como en el ejemplo del embaldosado de mosaicos cuadrados).

En física las simetrías de interés son las de sus leyes. Por ejemplo, las leyes de la Mecánica son las mismas en cualquier parte. Podemos construir un edificio en Antofagasta o Alicante utilizando las mismas leyes de Newton. La operación aquí se llama *traslación*. Podemos trasladar una máquina a cualquier lugar del Universo y si nos aseguramos de llevar todas las piezas, funcionará de idéntica forma. La simetría también puede definirse en relación al tiempo. Un motivo repetitivo de percusión, por ejemplo, puede escucharse partiendo en cualquiera de sus repeticiones sin que lo notemos. En física, las leyes resultan ser simétricas ante traslaciones temporales: no importa si comenzamos a construir el edificio hoy o en dos años, utilizaremos las mismas leyes físicas.

En 1918 Emmy Noether publicó su artículo *Problemas de variación invariantes*, en el que formuló el majestuoso teorema que dice más o menos lo siguiente: por cada simetría continua de un conjunto de leyes físicas, existe una cantidad que se conserva. El ejemplo más importante es el de la conservación de la energía. El *teorema de Noether* nos enseña que ésta es una sencilla consecuencia de la simetría bajo traslaciones temporales de la que hablamos más arriba. No es necesario invocar un principio superior o trascendente, ni engrosar el número de postulados de nuestras teorías

injustificadamente. Cuando Einstein recibió el trabajo de Noether, escribió a David Hilbert, director de la tesis doctoral de Weyl, «Ayer recibí de la señora Noether un artículo muy interesante. Estoy muy impresionado de que estas cosas puedan ser entendidas de una manera tan general. ¡La vieja guardia de Gotinga debería tomar algunas lecciones de la señora Noether!».

Para ilustrar este resultado tomaremos prestado un ejemplo del libro *La simetría y la belleza del Universo*, de León Lederman y Christopher Hill. Supongamos que la constante de la gravitación universal disminuyera un 10% todos los martes al mediodía durante una hora. Si así fuera, entonces los dueños de grandes represas podrían aprovechar esa hora para bombear agua y llenarlas con un gasto de energía menor a la ganancia que obtendrían al dejar caer la misma cantidad de agua una hora más tarde. ¡Obtendrían energía gratis!, posibilidad que contradice al principio de conservación de la energía. Y ¡claro!, en un Universo en el que la constante de gravitación universal variara, no se conservaría la energía, pues de acuerdo al teorema de Noether ésta se conserva sólo si las leyes de la física se mantienen constantes en el tiempo.

La gran asimetría

La obsesión de Emmy Noether por la simetría, su generosidad a la hora de compartir sus conocimientos con pares y discípulos que la reconocían

como una guía paciente en sus investigaciones, contrasta con el trato poco simétrico que recibió en su vida. Primero sufrió la discriminación que la academia alemana de principios del siglo pasado ejercía sobre las mujeres. Así, por ejemplo, mientras estudiaba en la Universidad de Erlangen, se dictó una norma que prohibía a las mujeres ser parte del alumnado regular. Capeó el temporal mudándose por unos años a Gotinga, en donde conoció a los más grandes matemáticos de la época. Noether navegaba sin quejas los turbulentos mares que el mundo académico dominado por los hombres ofrecía a una mujer. Tras graduarse, trabajó durante años sin recibir remuneración alguna en Gotinga. Sólo la fama que le otorgó su fructífera carrera le permitió abrirse paso, instaurando por un tiempo la simetría de trato que merecía.

El ser mujer dejó paulatinamente de ser un problema hasta que otra asimetría golpeó su vida: Emmy Noether era judía, razón por la que en 1933 fue expulsada de la universidad según las nuevas normas raciales impulsadas por el canciller Adolf Hitler. A esas alturas de su carrera, sin embargo, su fama internacional le permitió encontrar la forma de lidiar con esta inesperada y cruel tempestad refugiándose en los Estados Unidos. Noether fue reclutada por el *college* de mujeres de Bryn Mawr. Pero la asimetría siguió persiguiéndola. Esta vez en la forma de una muerte demasiado temprana, que terminó con su existencia menos de tres años

después de su llegada a Pensilvania. La muerte le daría esa simetría que en vida jamás consiguió.

Hermann Weyl fue uno de los oradores en el entierro de Emmy Noether. Él también tuvo que emigrar a Estados Unidos en 1933, pues su esposa era judía. Su discurso fue estremecedor y dejó en evidencia la enorme admiración que sentía por ella y los lazos de amistad profunda que los unía: «Eras una gran matemática. No tengo reserva en decir que la más grande que la historia haya conocido... Tu corazón no conocía la malicia. No creías en la maldad... Cuando no te dejaron usar los salones de la universidad, te juntabas con tus estudiantes en tu propia casa. Incluso aquellos que llegaban con camisas pardas. Nunca dudaste de su integridad. Sin importarte tu propio destino, con corazón abierto y sin miedo, siempre conciliadora, caminabas tu propio camino».

El legado de Noether a la física es incalculable. Hoy la simetría es el eje central de cualquier teoría fundamental. La simetría define teorías y da cuenta de muchas de sus propiedades, ya que al dictar sus cantidades conservadas restringe sus posibilidades dinámicas. Y las simetrías que observamos en el mundo microscópico son abrumadoramente bellas y elegantes. Simetrías que, a través del teorema de Noether, dan cuenta de las cantidades conservadas que observamos en la Naturaleza como la carga eléctrica y sus generalizaciones más sofisticadas que no vale la pena detallar aquí. El teorema

de Noether pudo además resolver algunos de los misterios más profundos de la Teoría de la Relatividad General de Einstein, uno de sus más grandes admiradores y otro de los elegidos para homenajearla en su funeral: «La señora Noether fue el más significativo de los genios matemáticos creativos que hasta ahora se ha producido desde que se estableció la educación superior para mujeres».

Quizás no sea exagerado pensar en Emmy Noether como una de las más importantes expresiones de libertad, creatividad y tesón que haya conocido el siglo XX. Ella tomó las pequeñas oportunidades que le ofrecía el universo de su época. Tomó las migajas, los caminos más largos y difíciles. Y sin quejarse, siempre con una sonrisa maternal frente a sus estudiantes y amigos, transformó la discriminación, el horror y la muerte, en una de las obras mas dulces y profundas de la historia intelectual humana.

ROMPIENDO LAS OLAS

Plinio el Viejo y la paz de las aguas

Fueron muchos los ciudadanos anónimos de Pompeya que perdieron la vida a raíz de la erupción del Vesubio, en el año 79. Quizás la víctima más conocida, aunque no esté del todo claro que su muerte pueda achacarse al estallido volcánico, fue el naturalista y filósofo Plinio el Viejo. Este formidable enciclopedista, que escribió más de 150 libros, fue nombrado prefecto de la marina romana por Vespasiano. Su curiosidad por contemplar de cerca la espectacular erupción, al tiempo que pretendía salvar a algunos amigos, le llevó a la muerte. Atravesó la bahía de Nápoles con una ligera barcaza. Ante la súplica del marinero que llevaba el timón para alejarse, adujo equívocamente, poco antes de morir: «la fortuna favorece a los valientes». Si se ha de morir y las prisas postreras no dejan al ingenio urdir un buen epitafio, ¡qué mejor que citar a Virgilio!

Pero no es la muerte de Plinio el objeto de estas líneas, sino una de las tantas agudas observaciones que pueblan sus escritos. La curiosidad de este polígrafo, amante del mar, lo llevó a apuntar un hecho que había llamado su atención. Es probable que, casi dos mil años después, éste siga teniendo el mismo efecto cautivador por su aparente inverosimilitud. Desde los tiempos en que vivió Jesús de Nazareth, según se tiene constancia, los marineros y navegantes apaciguaban las olas de las inmediaciones de los puertos, o en medio de una tormenta, arrojando un poco de aceite al mar. Una cantidad irrisoria de éste era suficiente, según los escritos de Plinio, para llevar pronta quietud a una extensión considerable de las aguas.

Seguramente se siguió utilizando este método durante siglos, pero no fue hasta 1757 cuando una de las mentes más brillantes de Estados Unidos, puesto azarosamente frente al fenómeno, pudo dar la primera explicación conocida, medianamente satisfactoria. Benjamin Franklin, quien se encontraba en un barco atracado en Louisbourg, contemplaba la estela que dejaban otras embarcaciones en el mar. Sorprendido, observó que dos de estas naves dejaban una estela lisa en el agua mientras que todas los demás dejaban tras de sí un oleaje desordenado por el viento, que soplaba con cierta intensidad. El capitán del barco, interrogado por Franklin, le respondió, con la fingida complacencia que se tiene ante un ignorante, que el fenómeno se debía a que seguramente aquellos barcos habrían descargado agua impregnada de grasa y aceite por el imbornal, untándose ligeramente en el proceso. El ilustre bostoniano había leído tiempo atrás la descripción de Plinio. Si bien no se le ocurrió otro argumento mejor en ese momento, desconfió de esa respuesta apresurada y se propuso retomar el tema en cuanto le fuera posible.

Benjamin Franklin, de la charca al espejo

Nuevamente embarcado, en 1762, Franklin tuvo la oportunidad de revivir el asombro de contemplar el sosiego de las aguas agitadas al entrar en contacto con el aceite. Un pasajero le comentó que los habitantes de las Bermudas utilizaban esta misma técnica para aquietar las aguas y así, viendo a través de ellas, poder pescar. De hecho, los buceadores del Mediterráneo también utilizaban esta técnica para tener una mejor iluminación solar bajo el agua. Les llegaba con sumergirse con un poco de aceite en sus bocas. Al liberarlo lentamente, éste, menos denso que el agua, subía a la superficie. También había visto el pasajero a los pescadores de Lisboa, cuando regresaban al río Tejo, vaciar una botella o dos de aceite para asegurarse poder hacerlo en aguas calmas. Franklin consultó exhaustivamente los libros de *filosofía experimental* de la época y no encontró ninguna referencia a este fenómeno.

En una estancia que realizó en Londres, el célebre inventor del pararrayos (quien descubriera

que los relámpagos no son otra cosa que corriente eléctrica), aprovechó la existencia de una charca en el parque público de Clapham para poder llevar a cabo su anhelado experimento. Un día de mucho viento en que la superficie de la charca ofrecía un aspecto rugoso, llevó una alcuza llena de aceite y arrojó una pequeña cantidad en el agua. «Observé que se expandió sobre la superficie con sorprendente suavidad, pero el efecto esperado de apaciguar las aguas no se produjo». Pensó en que podía deberse a que arrojó el aceite en la orilla de sotavento, donde las olas eran más grandes y el viento llevaba el aceite hacia la costa. Se dirigió a la otra orilla, en la que las olas se formaban. Allí, arrojó una cantidad de aceite «no mayor que una cucharilla de té», produciendo la calma de forma casi instantánea en una superficie equivalente a dos piscinas olímpicas, extendiéndose hasta la otra orilla. «Ese sector de la charca quedó tan liso como un espejo». ¿Cómo podría el aceite contenido en una cucharilla ser suficiente para apaciguar semejante extensión y volumen de agua?

Es interesante dejarse llevar por el ingenio de Franklin. Su aguda observación no pasó por alto la sorprendente rapidez con que el aceite se expandió sobre la superficie. «Si uno arroja una gota de aceite en una superficie pulida», observó, «ésta permanece en su sitio, esparciéndose apenas un poco». En el agua, en cambio, se esparce rápidamente produciendo los colores prismáticos característicos que se suelen ver en los puertos. Poco después sólo persiste el efecto de apaciguamiento descrito anteriormente, haciéndose casi invisible la capa de aceite por su extrema delgadez. Benjamin Franklin conjeturó la posible existencia de una fuerza muy intensa entre las partículas de aceite, tan pronto entraban en contacto con el agua, tendente a alejarlas entre sí. Dicha fuerza repulsiva actuaría también sobre los objetos que se posan o sumergen en el agua. «La intensidad de la fuerza, así como la distancia a la que opera, aún no he podido comprobarla, pero lo considero una pregunta curiosa que me gustaría poder comprender».

Rompiendo las olas

Franklin siguió pensando durante mucho tiempo en este fenómeno, al menos durante los siguientes quince años. Quizás hasta que fue puesto al frente del servicio de correos de Estados Unidos, en el que encontró de inmediato otras curiosidades que llamaron la atención de su mente inquieta. En una carta escrita en Londres, en 1773, describió las costumbres de los pescadores de arenque, quienes aparentemente identificaban a lo lejos los bancos de pesca por la calma de la superficie del mar, presumiblemente producida por aceites que liberaban los cuerpos de estos peces. En esta misiva deja constancia del resultado de varios años de cavilaciones. La forma en la que él entendía el fenómeno. «No parece haber una repulsión natural

entre el agua y el aire, como para evitar el contacto entre ellos», escribió Franklin, «el agua y el aire se entremezclan en la superficie». «Así, el viento, aire en movimiento, al pasar sobre la superficie del agua puede frotarla produciendo arrugas que, con la acción repetida, constituirán las futuras olas». Esta observación notable incluye la intuición de que una fuerza de poca intensidad, repetida periódicamente, puede provocar efectos enormes.

También evaluó la posibilidad de que la capa de aceite hiciera las veces de una manta que es planchada por el viento, presionando la superficie del agua e impidiendo la formación de las olas. El genial bostoniano conjeturó que la fuerza que, según él, llevaba al aceite a expandirse, impediría su adherencia al agua y al aire, separando ambas superficies, mediando entre ellas, haciendo que se deslicen suavemente y evitando las arrugas que causan las olas. La expansión del aceite se produciría «hasta que la repulsión mutua entre sus partículas se vea reducida a nada por la distancia». Esta curiosa observación, en parte errónea, gira en torno a una pregunta clave: ¿en qué momento deja de expandirse un líquido que se derrama sobre una superficie?

En el siglo XVIII apenas se tenían en cuenta las ideas de Leucipo y Demócrito, quienes habían postulado la existencia de los átomos casi 500 años antes de que Plinio entrara en escena. Si no hubiera una unidad mínima de materia, de hecho,

nada impediría *a priori* que una sola gota de aceite cubriera la totalidad de los océanos. El experimento de la charca de Clapham puede considerarse como una temprana evidencia de la existencia de los átomos (más precisamente, de las moléculas) e incluso permite llegar a conclusiones cuantitativas. No es difícil estimar el grosor aproximado de la capa de aceite del parque de Londres, siguiendo la descripción realizada por el propio Benjamin Franklin, en unas 2.5 millonésimas de milímetro, suponiendo que su distribución sobre la charca fuera homogénea. Si Franklin hubiera conjeturado que la unidad elemental del aceite —la molécula— tiene ese tamaño, no habría cometido un error significativo. Lo cierto es que el número de capas de espesor molecular contenidas en la lámina del espejo de Clapham ronda la decena, debido a una interacción eléctrica entre ellas que impide llegar al ideal de una capa de tan sólo una molécula de espesor.

Llegada a puerto

Benjamin Franklin especuló sobre la posibilidad de utilizar el aceite para evitar naufragios. Consideró poco fiables las observaciones de Plinio, pese a su aparentemente cuantiosa experiencia naval. Pero se entusiasmó cuando leyó en una carta que un barco holandés se había salvado de una furiosa tormenta porque el capitán arrojó aceite de oliva a barlovento. La carta había sido escrita por

un marinero, a pedido del capitán, en carácter de testigo directo, porque nadie daba crédito a esta historia. Benjamin Franklin no dudó en hacer la prueba.

Propuso a su amigo, el capitán Bentinck, el uso del aceite en la cercanía de las costas de Portsmouth, para evitar la virulencia del mar a la llegada de los barcos. Con todo cuidado, hizo arrojar aceite de una botella a través de un corcho, por un hueco tan fino como la canilla de una pluma de ganso, mientras otro grupo observaba desde la costa sus efectos. Él iba en el barco que pondría a prueba el confort de la llegada a puerto. El experimento falló. Si bien los que observaban desde tierra firme aseguraron haber visto la capa de aceite expandirse, el gran intelectual estadounidense llegó algo mareado. No quedó constancia de que dijera, como Neruda al llegar a puerto Picasso: «Y yo entonces desembarqué, y vi grandes mujeres de color manzana». Su vahído no fue suficiente para impedir que advirtiera que parte del movimiento del barco se debió al paso cercano de otra nave, y que esta fuente de oleaje, al no ser producto del viento, era inmune al untuoso dispositivo. En un alarde ejemplar de honestidad intelectual escribió «puede ser de utilidad relatar las circunstancias, aún cuando el experimento no haya sido exitoso, ya que puede dar pistas de cómo corregirlo. [...] Quizás debamos arrojar más aceite o hacerlo más lejos de la costa».

Es difícil imaginar que un gigante bravío como el mar pueda calmarse con una homeopática dosis de aceite. Sin duda se trata de un conocimiento adquirido azarosamente, por un involuntario desliz náutico o, quizás, por la audacia de un intrépido marinero. Es uno de los numerosos casos en los que la providencia se torna crucial en el avance del conocimiento. Casi tanto como la existencia de mentes despiertas como las de Plinio el Viejo y Benjamin Franklin, atentas a cualquier pista, por insignificante que esta resulte, que revele la abrumadora belleza que subyace a las leyes de la Naturaleza.

ESCATOLOGÍA DE LA CIENCIA (Y VICEVERSA)

Caminar por Valparaíso una mañana de verano es un buen modo de forzar que las mejores ideas afloren. Los científicos solemos pasear cuando se acaban las ideas. Cuando un problema se torna más difícil de lo esperado y los senderos que llevan a su solución se angostan hasta oscurecerse del todo. El ejercicio, la brisa marina, las coloridas callejuelas del puerto, nos ayudan a olvidarlo todo y a sumirnos en el universo abstracto de nuestra mente, buscando allí, en el arcón de las ideas inesperadas, aquella que nos está faltando.

Pero Valparaíso nos depara otra sorpresa. El andar distraído, ignorante de los aspectos más mundanos del ser, provoca que nuestro zapato derecho se hunda inadvertidamente en un voluminoso trozo de excremento canino. La forma más indigna de acabar con nuestras grandes aspiraciones intelectuales. En ese preciso instante, mientras ponderamos con desazón el estado de la suela, nos resulta atractiva la idea de que llegue el día en que

todos los problemas científicos se hayan resuelto. En el que nadie deba salir por las calles en pos de la ciencia, arriesgando la integridad de su calzado. El día en que la ciencia muera.

Al tiempo que cada perro que vemos se nos antoja culpable del escatológico accidente, una idea feliz surca nuestra mente. Si bien no es la primera acepción que se nos viene a la cabeza, la escatología, además de lidiar con excrementos como el que llevamos a cuestas, también hace referencia al final, a la muerte. Antes de ser conscientes de ello, estamos pensando en la escatología de la ciencia. Y en la ciencia de la escatología, pero ese es otro cantar. Nos consuela haber dado con una palabra que confiera unidad a lo que nos ocurre, desde la suela de los zapatos hasta la punta del sombrero.

Escatología de la ciencia

¿Se acabará la ciencia algún día? Algunos piensan que sí. Muchos científicos han anunciado, incluso, que ese final es inminente. La teoría final o teoría del todo, que resolvería todas las preguntas que podamos formular. Un conjunto de leyes que permitirían, a un computador suficientemente poderoso, simular o predecir cualquier fenómeno natural que deseemos. Toda la Naturaleza, desde una colisión subatómica hasta los avatares de la economía. Desde la evolución de las especies hasta las condiciones climáticas que se presentarán mañana, pasando por el estado psicológico del lector de estas líneas.

Se dice que Lord Kelvin, el gran físico irlandés, en un discurso dado en 1900, aseguró que no había «nada nuevo que descubrir en física; todo lo que queda son medidas más y más precisas» de las teorías conocidas, «salvo por un par de nubarrones»: el experimento de Michelson-Morley y la radiación de cuerpo negro. Esa física que consideraba establecida para siempre incluía su extravagante teoría en la que los átomos eran ovillos de vórtices de éter. Los nubarrones no se disiparon con el sosiego imaginado por Lord Kelvin. Esclarecerlos demandó la construcción de la Mecánica Cuántica y la Teoría de la Relatividad, que revolucionaron nuestra comprensión de la Naturaleza.

Stephen Hawking también fue presa de similar entusiasmo cuando, hace un cuarto de siglo, anunció la inminencia de una teoría final, «último triunfo de la razón humana, que nos permitirá conocer la mente de Dios». Otros pregonan en la actualidad que la Teoría de Supercuerdas podría ser la teoría final que unifique las leyes fundamentales de la física, otorgándonos una comprensión completa de la materia, sus interacciones, el espacio y el tiempo. Las palabras de Carl Sagan, «la ciencia moderna ha sido un viaje hacia lo desconocido, con una lección de humildad aguardando en cada parada», sin embargo, constituyen una llamada a la cautela.

Pero no podemos hablar de la muerte de la ciencia sin recordar su nacimiento. Los tiempos en

que cada avance científico, por modesto que fuera, implicaba una gran aventura. Un esfuerzo de connotaciones épicas. Como la de uno de los padres del pensamiento científico moderno, Francis Bacon, que acabó costándole la vida.

Francis Bacon, experimento y muerte

La entrada de Bacon en la dimensión escatológica se produjo en 1626. Se podría decir que ofrendó su vida por una obcecada fidelidad al método científico, por una pulsión irrefrenable de saciar su curiosidad. Conocemos los hechos que dieron fin a su vida a partir del relato que apareció en *Brief lives* de John Aubrey en 1669. Ocurrió al norte de Londres, una gélida noche de principios de abril en la que Bacon viajaba en compañía del Dr. Whiterborne, médico del joven rey Carlos I. Éste seguía con atención las curiosas palabras de su acompañante quien, con la mirada perdida, parecía subyugado por el manto blanco que todo lo cubría. «No veo ninguna razón por la que la nieve no pueda servir para preservar la carne, en lugar de la sal», acabó de razonar Bacon, y pidió al chofer que detuviera a los caballos. Un espíritu curioso como el suyo no podía demorar la puesta a prueba de una hipótesis tan audaz.

Los dos contertulios se bajaron a las puertas de una casa humilde en las faldas del monte Highgate y compraron una gallina eviscerada. Rellenaron la oquedad con abundante nieve. La operación llevó

demasiado tiempo, a la intemperie, y Bacon cayó enfermo. Tuvo que refugiarse en la mansión de un noble, donde se le brindó el calor de una cama. Ésta, sin embargo, estaba húmeda por falta de uso y el catarro se convirtió en una neumonía. En menos de tres días Bacon murió asfixiado. En su lecho de muerte, agonizante, dictó una carta para Lord Arundel, el ausente dueño de casa, en la que recordó, identificándose con ella, la fatídica curiosidad que empujó a Plinio el Viejo a las faldas del Vesubio durante la erupción que destruyó Pompeya. Hombres que llevaron la experimentación hasta sus últimas consecuencias y no perdieron el rigor del método hasta consumir el aliento postrero.

El universo como un ordenador

El método científico ha acompañado el desarrollo de todas las áreas de la ciencia con innegable éxito. Pero la observación sistemática y cuidadosa de la Naturaleza es sólo uno de los ingredientes necesarios en la construcción de teorías científicas. También está el deseo de unificar. De entender la mayor cantidad de fenómenos a partir de la menor cantidad de leyes. Isaac Newton, por ejemplo, fue capaz de unificar el movimiento de objetos sobre la superficie terrestre con aquel de los astros en el cielo, a través de su ley de la gravitación universal.

Varios siglos después, la Mecánica Cuántica fue capaz de explicar los fenómenos atómicos, unificando las ciencias físicas con la química. Más tarde,

en la segunda mitad del siglo XX, los físicos construyeron el Modelo Estándar de las partículas elementales, que describe todas las interacciones fundamentales con excepción de la gravedad. La incorporación de ésta al dominio de la Mecánica Cuántica es el gran problema abierto de la física teórica contemporánea y, para algunos, el único ingrediente faltante para conseguir esa teoría final que sacaría a la física de los laboratorios para convertirla en una pieza de museo.

Si tuviéramos una posibilidad de cálculo ilimitada, la teoría final podría explicar, en principio, cualquier fenómeno. Nosotros mismos, después de todo, al igual que lo que nos rodea, no somos más que un enorme conjunto de átomos en constante y sofisticada interacción. Así, con un ordenador suficientemente poderoso podríamos explicar o, si se quiere, replicar, desde los átomos a las células, de las células a la mente humana, a la psicología, la sociología, la economía. Hay que decir, claro está, que ninguno de estos fenómenos parece servirse de la gravedad en modo alguno. Sin embargo, la unificación de la gravedad con las restantes interacciones resultaría clave para comprenderlos mejor, ya que daría lugar a una teoría superadora en cuyo marco es de esperar que puedan formularse nuevas y mejores preguntas.

Uno y el universo

Se podría objetar que el obstáculo estriba mucho más en la posibilidad de disponer de un ordenador semejante que de la teoría en sí. Pero a los científicos nos gusta hablar de cosas que podríamos hacer *en principio*, sin importar mayormente la posibilidad real de llevarlas a cabo. Así, en este sentido preciso, una teoría unificada podría explicarlo todo. ¿Sería esto realmente una comprensión de los fenómenos naturales? Nos parece que no. Y hay al menos dos razones.

Primero, tal como elaborara el notable físico británico Freeman Dyson en su libro *Infinito en todas direcciones*, no es razonable pensar que exista, a nivel fundamental, una teoría final. El intelecto humano parece suficientemente creativo como para tener siempre una nueva pregunta que guíe la exploración hacia nuevos rumbos. Por otra parte, no hay nada que nos invite a pensar que el proceso evolutivo que nos llevó a poblar este planeta haya llegado a su fin. Podemos fantasear con seres conjeturales para los que nuestra inteligencia sea risible por sus limitaciones manifiestas. Al igual que sabemos que nuestro gato pasará toda su vida persiguiendo el punto rojo que produce el puntero láser sin ser capaz de colegir su origen, es razonable pensar que los seres humanos tengamos limitaciones análogas impuestas por la arquitectura de nuestro cerebro.

En segundo lugar, parece sensato argumentar que una simulación no constituye explicación alguna, ya que jamás podrá satisfacer nuestra curiosidad. Aunque un ordenador pudiese, algún día,

replicar la crisis económica de las *sub-prime* a partir de las leyes fundamentales de la física, no renunciaríamos a una explicación económica. Porque es la economía la que nos brinda —o así debería ser— conceptos inteligibles que, aunque estuvieran basados en principios microscópicos que fuéramos capaces de emular, son los que nos ofrecen la posibilidad de razonar, de cotejar con nuestros estados mentales y con la modesta porción de realidad a la que tenemos acceso. Aunque existiera la teoría final, necesitaríamos las rústicas leyes de cada disciplina para tener una idea de cómo funcionan las cosas a la escala del hombre.

Ciencia de la escatología

La escatología de la ciencia es, como vemos, un tema arduo. Probemos con su reverso, la ciencia de la escatología, el estudio de los excrementos, algo más pertinente para acompañar nuestro accidentado paseo porteño. Nuestro cuerpo es una máquina sofisticada que los produce en razonable abundancia. No se trata aquí de explicar los mecanismos que subyacen a tan desprestigiada industria, sino de mostrar con un ejemplo sencillo que la ciencia de la escatología puede resultar un terreno fértil. Para otra ocasión dejaremos el abordaje de temas tan apasionantes como los transplantes fecales o la peligrosidad de las colonoscopías explosivas.

Del lado oriental de la Cordillera de los Andes, en Argentina, en presencia de una persona pedante, creída de sí misma, se dice que *está más agrandada que sorete en kerosene* —en castellano algo más académico diríamos *más agrandado que zurullo en queroseno*—. Tendemos a creer que los dichos populares son herederos de saberes milenarios. Si se acuñó un dicho tan preciso, pensamos, es porque la evidencia experimental que le da sustento debe ser abundante. El físico argentino Alberto Rojo, con aconsejable escepticismo, tomó cartas en el asunto. Primero interrogó a químicos, físicos y bioquímicos para encontrar un veredicto proveniente de la ciencia teórica fundamental. Todas las respuestas que obtuvo, sin embargo, se limitaban a intentar explicar la veracidad del mito desde las especialidades respectivas. Ninguna le pareció convincente.

Ni corto ni perezoso, emulando el ímpetu explorador de Plinio y de Bacon, Rojo acometió de inmediato la visceral búsqueda de la verdad, experimentando con muestras propias. Las separó en dos lotes, uno lo sumergió en agua, el otro en queroseno. El lacónico informe final, en sus propias palabras, indica que «al cabo de 30 horas no hubo expansión apreciable». Si bien sus resultados deben considerarse preliminares, en ausencia de literatura científica sobre el tema, es prudente concluir la rotunda falsedad del dicho.

Este experimento pone de manifiesto —entre otras cosas— que estamos tan lejos del fin de la ciencia, que ni siquiera podemos predecir la veracidad de un dicho popular a partir de leyes fundamentales. La ciencia es hecha por científicos, y estos parecen esquivos a abocarse al estudio de la física y química de los excrementos. Así, pues, resulta que nuestra suela de zapato tuvo la desdicha de hundirse en uno de los tantos puntos ciegos que las calles de Valparaíso, como tantas otras del planeta, ofrecen a la ciencia.

LEONEL O LA CIENCIA DEL TIRO LIBRE

¿Qué pensamientos surcaban la mente de Leonel Sánchez a las 14:41 del 10 de junio de 1962? El silencio expectante de 17.268 almas envolvía la atmósfera del estadio *Carlos Dittborn* de Arica. Tras la indignación por un penalti no cobrado, el público contenía la respiración mientras el talentoso integrante del ballet azul acomodaba con sus manos la fría pelota de cuero, a centímetros del área. Abstraído, escuchando el latido cadencioso de su corazón, contemplaba algún indeterminado detalle del balón, quizás buscando el punto preciso en el que calculaba impactarlo. A pocos metros de distancia, el mítico Lev Ivanovich Yashin, de mirada desafiante, acomodaba a gritos a los fornidos defensores que conformarían la barrera de sólo tres hombres, pues el tiro directo era improbable. Mucho más para un zurdo.

Seguramente tiraría un centro al área. Intentar el disparo directo era una osadía sólo concebible en la cabeza de Leonel. Había ensayado este tiro

infinidad de veces. Le había robado tiempo a todo en su vida sólo para preparar este instante. Sabía que tenía que chutar a portería a pesar del pésimo ángulo hacia la red, demasiado escorado hacia la izquierda, cerca del vértice del área. Era la oportunidad que siempre había estado esperando.

Newton y el top spin

Del otro lado del mundo, 290 años antes, sir Isaac Newton escribía una carta a la *Royal Society* con lo que llamó su nueva teoría sobre la luz y los colores. Observando la trayectoria de los rayos del Sol al atravesar un prisma, en un dormitorio de su casa, Newton se preguntaba el cómo y el porqué del cambio de la trayectoria de la luz al pasar de un medio a otro. En un ejercicio de reflexión científica sin complejos, el físico más grande del siglo XVII señaló sus sospechas sobre el posible mecanismo responsable del fenómeno: «[...] cuando recordé que a menudo había visto una pelota de tenis, golpeada por una raqueta oblicua, describir ese tipo de curvas».

En las plácidas tardes que pasaba en la campiña del *Trinity College*, en Cambridge, había observado cómo «al dar un golpe circular y progresivo a la pelota con la raqueta [...], los movimientos conspiran, presionando la capa contigua de aire más violentamente que la del otro lado del golpe, lo que provoca una reacción del aire proporcionalmente mayor». Newton describía así el *top spin*,

una vistosa trayectoria que realiza la pelota al ser golpeada oblicua y tangencialmente. «Si los rayos de luz están compuestos por cuerpos globulares —continuó su argumentación—, al pasar de un medio a otro deberán adquirir un movimiento circular y sentir la mayor resistencia del ambiente de éter en un lado, siendo continuamente arqueadas hacia el otro».

A pesar de que la historia mostraría que estaba equivocado en cuanto a la luz, sus argumentos respecto del mecanismo que curvaba la trayectoria de una pelota de tenis son asombrosos para la época.

Fuerzas sobre el balón

Leonel Sánchez intuía que no sólo los jugadores son responsables del destino de una pelota de fútbol. Cuando el jugador patea el balón, sólo puede darle una dirección, una velocidad y un espín inicial (un giro sobre su propio eje, como la Tierra al rotar). Luego de esto, los dados están echados. Su futura trayectoria está determinada por otros actores: las leyes de la física.

Si jugáramos al fútbol en el espacio intergaláctico, por ejemplo, todos los tiros serían rectos. La velocidad de la pelota no cambiaría hasta encontrarse con otro jugador, el travesaño o la red. Es la primera ley de Newton en acción. Si el partido, en cambio, se jugara en la Luna, notaríamos que las trayectorias se ven afectadas por la fuerza de gravedad. Toda pelota, tarde o temprano, cae al

suelo. Pero nosotros jugamos sobre un planeta en el que además de la gravedad hay otras fuerzas. Éstas las ejerce el aire. En efecto, la atmósfera está detrás de los tiros más sofisticados y espectaculares. Sus efectos no están exentos de complejidad. El más obvio de ellos es el frenado de la pelota por la fricción con el aire, una fuerza siempre contraria a su movimiento. Podemos experimentarla con el simple gesto de sacar la mano por la ventana de un coche en movimiento. A esa capacidad de frenado se encomendaban los defensores soviéticos, en caso de que Sánchez tuviese la audacia de tirar directamente a portería.

Frente a un país paralizado que lo escuchaba por la radio —unos pocos privilegiados podían disfrutar de la primera transmisión televisiva de un mundial de fútbol—, Sánchez arqueó su cuerpo levemente hacia adelante para iniciar una medida carrera de nueve pasos, de frente al balón, y golpearlo con la parte exterior del empeine izquierdo, *tres dedos*, con un violento impacto asestado en ese punto imaginario en el que se detenía su mirada segundos antes. La pelota salió con una velocidad de poco más de 100 kilómetros por hora.

Frente a la evidencia definitiva de que Leonel había elegido tirar a portería, los defensores soviéticos no parecían muy seguros de desear que la pelota se estrellara en la barrera que conformaban. El inolvidable jugador de la Universidad de Chile aún siguió su carrera un par de pasos, por inercia, sabiendo en su interior que el golpe había sido perfecto. Es que además del frenado, la atmósfera puede ser aprovechada por un buen ejecutor de tiros libres de al menos dos maneras más. Leonel supo hacerse de esos favores con brillantez. Si hubiese pateado ese tiro libre en la Luna, este legendario gol no se habría convertido. Afortunadamente estaba en Arica. Toda una atmósfera a disposición del habilidoso 11 de *La Roja*.

Magnus y las cavilaciones de Yashin

Cuando la pelota gira sobre sí misma en vuelo, su trayectoria se curva en la misma dirección de su espín. Esto ocurre debido a una fuerza perpendicular a su movimiento, conocida como sustentación. Ésta, que ya había sido apreciada por Newton y discutida por un ingeniero de artillería británico, Benjamin Robbins, en 1742, fue estudiada por primera vez en detalle por el físico y químico alemán Heinrich Gustav Magnus, 110 años antes de que Leonel Sánchez la utilizara en Arica.

Nacido en Berlín en 1802, Magnus fue un lúcido profesor universitario, cuyas clases se llenaban de entusiastas estudiantes. Era esencialmente lo que llamaríamos un científico aplicado, alguien al que le gustaba implicarse en los problemas derivados de la actividad de una fábrica o de un taller, antes que en aquellos de corte más académico. Su interés en el tema provino, de hecho, por su afán de entender las trayectorias curvas de las balas de

cañón que tenían espín. Hoy este fenómeno se conoce como *efecto Magnus*.

Este *efecto* tiene distintos orígenes. Uno de ellos es el principio de Bernoulli, que dice que los fluidos disminuyen su presión a mayores velocidades. Si el balón está girando, arrastrará con él la capa de aire que está en contacto con su superficie. Es lo que ocurre, por ejemplo, con esa enorme pelota rotante en la que vivimos, la Tierra, y la capa de aire cercana a su superficie, la atmósfera. De no ser así, experimentaríamos vientos de una intensidad aterradora: la superficie de la Tierra se debe mover (en el Ecuador) a más de 1.500 kilómetros por hora para completar su giro en un día. Si la atmósfera no girara con la Tierra, arrastrada por ella, la furia de Eolo no dejaría nada en pie. Una caminata por las calles de Quito en un día calmo es suficiente para desterrar tal posibilidad.

A diferencia de la Tierra que surca el vacío, sin embargo, el balón se mueve por el aire, a través de la atmósfera. Así, el que golpeó Leonel con el borde externo de su zurda salió de su bota girando sobre sí mismo en el sentido contrario al de las agujas del reloj (visto desde arriba). Si el giro es de unas 7 vueltas por segundo, el efecto es muy pronunciado. En el lado izquierdo del balón, el arrastre va en la misma dirección del viento que pasa rasante sobre él. En el lado derecho es al revés. La velocidad del viento será, por lo tanto, menor del lado derecho, donde el arrastre empuja el

aire hacia adelante. De acuerdo con el principio de Bernoulli, la presión será mayor de este lado y el balón será impulsado por la propia atmósfera hacia la izquierda. El mítico Yashin, la *Araña Negra*, quien vio salir el balón en dirección al centro del arco, probablemente pensó que el impacto que todo Chile contemplaba con máxima tensión había salido con un espín algo más moderado y que, por lo tanto, no le sería suficiente con los favores de Magnus.

Turbulencias y folha seca

Leonel Sánchez no parecía inquieto por una posible insuficiencia del efecto que le imprimió al disparo. Su diálogo mudo con la atmósfera tenía otra sorpresa reservada: la turbulencia. Pensemos, por ejemplo, en el humo de un cigarrillo. Éste sube en una columna recta y delgada, hasta que a cierta altura, de manera repentina, el orden se termina. El humo forma remolinos, se desordena y se dispersa. Técnicamente se dice que pasó a un régimen turbulento. De modo similar, a velocidades suficientemente bajas, el aire que pasa por la superficie del balón en movimiento lo hace de modo ordenado. Se mueve como una larga y peinada cabellera a su alrededor. Cuando la velocidad de la pelota es suficientemente grande, en cambio, el aire se desordena, la cabellera se despeina. Pasamos a un régimen turbulento. El roce con el aire disminuye enormemente en esta situación. Así, si

el disparo es suficientemente violento, y el de Leonel lo fue, el balón frenará mucho más lentamente de lo usual. Como si la atmósfera, respetuosa, le cediera el paso. Su trayectoria resultará poco intuitiva para el espectador: durante una fracción de segundo viajará sin disminuir su velocidad de forma apreciable. Así lo puede atestiguar el defensor de la izquierda de la barrera, quien vio pasar un misil sobre su cabeza, apenas 3 décimas de segundo después del impacto.

Yashin, quizás el mejor portero de todos los tiempos, hizo un balance que estimó favorable. El balón no llevaba un espín demasiado grande y la potencia del disparo lo enviaría, con toda seguridad, por encima del travesaño. Pero el comportamiento de la atmósfera es mucho más complejo. Al perder la pelota un poco de velocidad, llegará un momento en que la transición al régimen no turbulento o laminar, ocurrirá indefectiblemente. El roce crecerá repentinamente a valores muy altos y el balón sentirá como si el aire se transformara en miel. Se frenará tan rápidamente que bajará de manera abrupta antes de salir del campo, como una hoja seca de otoño. Inventada poco antes por Waldir Pereira, el inolvidable *Didí* del Brasil de *Pelé* y el Real Madrid de Puskás y Di Stéfano, esta técnica de disparo fue perfeccionada por algunos de sus compatriotas como *Zico* o Juninho Pernambucano. Por la similitud mencionada, se la denominó *folha seca*. El disparo de Leonel bajó súbitamente y se alejó de Yashin rumbo al primer palo, impulsado por el soplido postrero de Magnus, describiendo una maliciosa curva que lo llevó lejos de su alcance. Siguiendo la trayectoria que llamara la atención de Newton, a la que Leonel añadió una pizca de la otoñal receta brasileña, el balón se coló en la portería soviética ante el estupor y la perplejidad de su legendario guardameta.

Es difícil imaginar los pensamientos de Leonel Sánchez a las 14:41 del 10 de junio de 1962. Chile se jugaba el paso a semifinales contra un rival poderoso y sobre sus hombros pesaba la responsabilidad de contribuir sustancialmente a superar tan complicado escollo. Es fácil, sin embargo, adivinar aquello en lo que no pensaba. No pensaba en que si le pegaba con el borde externo el balón adquiriría espín en contra de las agujas del reloj, girando una media docena de veces por segundo mientras volaba. No pensaba en que a la velocidad que le imprimió con su chute, las turbulencias disminuirían mucho el roce con el aire, ni que esa fuera la causa por la que el balón parecería un proyectil imparable que pasaba por arriba y a la derecha de la barrera. No pensaba en que al bajar la velocidad las turbulencias cesarían, permitiendo al aire frenar rápidamente el balón, originando una abrupta caída. Que, además, el efecto Magnus, potenciado por la sequedad atmosférica de Arica, curvaría la

trayectoria hacia la derecha del sorprendido Yashin, quien sólo alcanzaría a verlo pasar a su lado, clavándose en el primer palo. Tuvo, sin embargo, la sabiduría del que juega con esas entelequias diariamente, aún sin nombrarlas. El resultado, después de todo, sería el mismo. La voz metálica de la radio proclamando, desde Antofagasta a Punta Arenas: «¡Gol de Chile! ¡Justicia divina!».

LA ERA DEL HELIO

¡Feliz año nuevo! Un ramillete de globos de helio se pierden en la altura mientras brindamos por la llegada de un nuevo año del calendario Gregoriano. Los globos desaparecen en la oscuridad tan rápido como el *champagne* de nuestras copas. Vacías del noble brebaje, éstas ofrecen una imagen fugazmente triste. Los amigos siguen abriendo botellas y da la impresión de que hay más de las que seremos capaces de beber. Pero el otro noble de esta escena, el helio, ése que perderemos en la atmósfera y nadie parece echar de menos, corre una suerte mucho más infausta. A diferencia del *champagne*, dorado y renovable recurso, el helio se nos acaba para siempre. Pronto los festejos no tendrán más globos elevándose hacia el cielo. Tendremos que conformarnos sólo con las burbujas del *champagne*.

La nobleza del helio

El helio es el segundo elemento más liviano de la tabla periódica después del hidrógeno. En

su núcleo contiene dos protones y —en su forma más común— dos neutrones. A las temperaturas y presiones terrestres se encuentra en estado gaseoso. Los electrones que rodean al núcleo están tan cómodamente dispuestos que no tienen incentivo alguno en compartir sus órbitas con algún otro elemento. Esto significa que el helio, en condiciones normales, es un ser solitario que no genera enlaces con nadie. Ni siquiera con otro átomo de helio. Normalmente encontramos a sus átomos dispersos, a distancias grandes de otros átomos, esto es, en forma de gas. Un gas inerte o noble, como todos sus compañeros de la columna derecha de la tabla periódica. Y como no genera enlaces químicos tampoco se relaciona con las moléculas de nuestra biología. Así, el helio no tiene sabor ni olor ni es tóxico.

El helio es un gas de densidad muy baja por lo que flota sobre casi todos los demás. Es por ello que resulta útil para rellenar los globos que adornan nuestras celebraciones. Para hacernos una idea de su baja densidad, consideremos el mismo peso en helio que el del *champagne* que cabe en una botella. Con esa cantidad podemos llenar seis mil botellas del noble elemento a temperatura y presión ambientales. El mismo peso de aire, por ejemplo, sólo permite llenar poco más de ochocientas. Al tratarse de un gas con constituyentes tan livianos, el sonido se propaga a través suyo a una velocidad muy alta, casi el triple de aquella

con la que lo hace en la atmósfera, en las mismas condiciones de presión y temperatura. Esa es la razón por la que hablamos con voz aflautada si inhalamos helio hasta llenar nuestros pulmones, como en la hilarante escena del tiroteo de la película *Broadway Danny Rose* de Woody Allen.

La nobleza del helio explica varias de sus propiedades más notables. Como es malo para generar enlaces, es el gas más difícil de licuar o solidificar. Debemos bajar su temperatura por debajo de los -269 grados Celsius (apenas 4 grados sobre el cero absoluto de temperatura) para tenerlo en estado líquido. A presión atmosférica, es el único elemento que no estará en estado sólido a esa temperatura.

El helio y el Sol

El 22 de diciembre de 1870 habría un eclipse total visible desde la cuenca del Mediterráneo. Pero el astrónomo francés Jules Janssen, un hombre obsesionado con el Sol, vivía en París, ciudad que en ese momento estaba sitiada por las fuerzas prusianas de Guillermo I. No había forma de viajar al sur para aprovechar el evento astronómico que le permitiría estudiar su estrella favorita. Pero su obsesión científica era irrefrenable. Tanto como su patriotismo. Sus colegas ingleses le habían conseguido un salvoconducto para traspasar las líneas prusianas en una expedición científica. Pero Janssen no aceptó lo que consideraba una humillación, por lo que decidió emprender un viaje aéreo y el

2 de diciembre abordó el *Volta*, globo aerostático en el que escapó de París. Veinte días después estaba en Orán, Argelia, esperando el eclipse. Pero lo que no pudo el ejercito prusiano lo consiguió un puñado de nubes, impidiéndole ver el ansiado espectáculo celeste.

Pero no siempre la suerte le había dado la espalda a Janssen. Dos años antes, el 18 de agosto de 1868, observando un eclipse en India se dio cuenta de un componente de la luz solar que nadie había notado. Era luz amarilla, de una longitud de onda que no podía ser explicada por ninguna sustancia conocida en la Tierra. Dos meses más tarde, el astrónomo inglés Norman Lockyer, fundador de la revista *Nature*, observó el mismo fenómeno. Convencido de que se trataba de un nuevo elemento, lo llamó *helio*, en honor al dios griego del Sol. Y como si la historia hubiese querido homenajear a Janssen y a su audaz escape en globo por sobre una París asediada, el nuevo elemento se transformó con el tiempo en el más importante, seguro y útil relleno para todo tipo de globos aerostáticos.

Curiosamente, el helio fue observado en el espacio antes que en la Tierra. Fue la primera vez que un elemento químico era descubierto en un cuerpo extraterrestre. Tuvieron que pasar 14 años para que el físico italiano Luigi Palmieri detectara su presencia en la lava del volcán Vesubio y 11 años más para que fuese aislado de un mineral rico en uranio llamado *cleveíta* en homenaje al químico sueco Per Teodor Cleve, uno de los primeros en lograr extraer suficiente helio del mineral como para estudiar sus propiedades.

El helio es el segundo elemento más abundante del Universo después del hidrógeno. Sin embargo, es más bien escaso en la Tierra. Es demasiado liviano para quedar atrapado en la atmósfera en cantidades importantes y como es huraño no forma compuestos con otros átomos. A pesar de esto y por fortuna, se puede crear. Fue el gran Ernest Rutherford quien en 1907, el mismo año de la muerte de Janssen, mostró que las partículas *alfa*, un componente común de las emisiones radiactivas, no eran otra cosa que núcleos de helio. El uranio presente en la *cleveíta*, por ejemplo, decae en otros átomos más estables emitiendo estas partículas, que son atrapadas dentro del propio mineral, transformándose en los átomos de helio que pudo aislar Cleve en Suecia. Las entrañas de la Tierra son, de este modo, una buena fuente de helio, el que hoy se extrae, principalmente en los Estados Unidos, de los yacimientos de gas natural. Lamentablemente el proceso de formación es muy lento. Y el helio se nos está acabando.

Helio líquido

La importancia del helio en nuestra sociedad poco tiene que ver con los globos que desaparecieron en la oscuridad tras las campanadas de año nuevo. Los imanes del Gran Colisionador de

Hadrones (LHC) del CERN utilizan 120 toneladas de helio para su refrigeración. El precio de este refrigerante es similar al del *champagne* que debió comprarse para celebrar el descubrimiento del bosón de Higgs, pero sube año a año debido a su comentada escasez. ¿Por qué es necesario un refrigerante tan oneroso?

Todo empezó cuando el holandés Heike Kamerlingh Onnes, el *Sr. Frío* de la ciencia, consiguió licuar el helio. Kamerlingh Onnes, quien también fue el primero en observar la superconductividad a bajas temperaturas, ganó el premio Nobel de física en 1913 por este espectacular logro. Fue capaz de llevar el helio a una temperatura de apenas 1.5 grados sobre el cero absoluto, comprobando que aún se mantenía líquido. No podemos ocultar el entusiasmo que producen las sensacionales consecuencias de este descubrimiento: disponemos de un fluido que se mantiene líquido a temperaturas tan bajas que cualquier otra sustancia conocida ya estaría en estado sólido. Estamos, sin duda alguna, frente al rey de los refrigerantes.

Con el helio podemos bajar la temperatura de cierta clase de materiales hasta transformarlos en superconductores, esto es, conductores de electricidad capaces de permitir el paso de corriente eléctrica sin resistencia alguna. Esto es precisamente lo que requiere el LHC. Conseguir temperaturas suficientemente bajas como para producir, en sus bobinas superconductoras, los enormes campos

magnéticos que se requieren para dirigir los haces de partículas que se harán colisionar. El LHC es el refrigerador más grande del planeta. Pero no es necesario ir tan lejos. Podemos encontrar imanes hechos de superconductores en cualquier hospital del mundo. Los equipos de imágenes por resonancia magnética son parte esencial de la medicina contemporánea. Dentro de cada uno de ellos fluye helio líquido que enfría sus imanes. Sin helio, al menos por ahora, estas máquinas serían imposibles.

Necesitamos al noble misántropo tanto o más que al *champagne*. Quizás sea por eso que, mientras alzamos una nueva copa, nos dispongamos a escuchar emocionados la voz aguardentosa de Tom Waits cantando esa canción de Mark Orton: «This blinding kiss breathes helium into my heart».

OXÍGENO PARA UN DISIDENTE

Mudarse de oficina es extenuante. Llenar cajas de libros, deshacerse de papeles viejos, repasar una vez más la historia de tu vida a través de las ruinas del pasado. Cargar física y emocionalmente con las cajas para llevártelas a otro lugar en donde comenzarás a dibujar una nueva vida laboral. Al final de una tarde inmerso en estas tareas, bajas al café de la facultad y te encuentras con un puñado de colegas que hablan sobre política y matemática. Te pides una *Ginger Ale* fría y te sientas con ellos. Los escuchas, con aire ausente, mientras respiras profundamente y sientes el paso de las heladas burbujas por tu garganta que, poco a poco, te devuelve las fuerzas que creías extinguidas.

De pronto, un *déjà vu* histórico, extemporáneo, pasa por tu mente. Te ves en la mesa de un café de Londres, en 1765, tomando cerveza negra y vino de Oporto. A tu alrededor, los más connotados intelectuales liberales de la época discuten los mismos temas que tus colegas habrían de debatir años

después. Allí, ante tus ojos incrédulos, está el legendario *Club de las pelucas honestas* que se reunía jueves por medio en el *London Coffee House*. El científico y político Benjamin Franklin, el filósofo y matemático Richard Price, entre otros, y aquel que fue responsable de la conexión neuronal que te hizo viajar en el tiempo y en el espacio, el gran científico, teólogo y político Joseph Priestley.

Vuelves a respirar una honda bocanada y el oxígeno que Priestley descubrió hace 240 años te hincha los pulmones. Bebes otro trago de gaseosa y la efervescencia que también él desarrolló poco antes, calma tus angustias con su refrescante cosquilleo. Después de todo, piensas, es sólo una mudanza de oficina. Quizás haya mínimos elementos comunes, pero lo tuyo es una nimiedad al lado de lo que vivió Priestley, por ser un auténtico disidente, apoyar públicamente aventuras como la Revolución Francesa y la independencia de los Estados Unidos, y combatir con ardor la intolerancia religiosa. Fue perseguido hasta el punto de que su casa acabó siendo saqueada e incendiada junto a los más bellos aparatos de investigación científica que hayan existido en la época. No pudo hacer cajas. No se mudó de oficina. En 1794, cruzó el Atlántico y se instaló en Pensilvania para nunca más volver.

Pasión por los gases

Priestley se interesó en los gases en 1767, cuando se mudó a Leeds como reverendo de una con-

gregación religiosa. Al lado de la casa en donde fue alojado, estaba la cervecería *Jacks and Nell*. Allí descubrió que los grandes recipientes en que se fermentaban los extractos de malta emitían «aire fijo», el gas que Joseph Black había descubierto en Escocia doce años antes. Este gas, que hoy conocemos como anhídrido carbónico o dióxido de carbono, es uno de los compuestos resultantes del proceso de fermentación. Es de lo que están hechas las burbujas de la cerveza y el *champagne*.

Al verter agua de un recipiente a otro repetidamente sobre las tinajas de cerveza, Priestley notó que ésta adquiría efervescencia. La misma que hoy encontramos en un sinnúmero de bebidas cuyo comercio ha dado lugar a auténticos imperios empresariales. Acostumbrado a la cultura abierta y franca de los apasionados debates del *Club de las pelucas honestas*, discusiones en las que nada se escondía y las ideas se compartían entre burbujeantes vasos de cerveza *Porter*, sin embargo, nunca protegió la idea ni intentó hacer una industria a partir de ella. El negocio lo desarrolló el emprendedor alemán Johann Jacob Schweppe, quien industrializó el proceso unos años más tarde fundando la compañía *Schweppes* en Ginebra. El resto es historia conocida.

Fotosíntesis: la restauración del aire

Fue a principios de los años '70 del siglo XVIII cuando Priestley hizo sus experimentos más memorables. Cualquier niño sabía que un animal

atrapado en un frasco sellado moría al poco tiempo. ¿Pasaría lo mismo con una planta? Priestley descubrió, con sorpresa, que esto no ocurría. Una planta podía sobrevivir sin ningún efecto aparente dentro del frasco sellado durante meses. ¿Sería que las plantas, a diferencia de los animales que respiran, no deterioran el aire? Para probarlo hizo otro experimento. Puso una planta y un ratón en el mismo frasco. Con enorme sorpresa descubrió que el animal sobrevivía más tiempo ahora que en ausencia de la planta. De algún modo, la planta tenía el poder de *restaurar* el aire.

Más tarde Priestley diseñó uno de sus experimentos más ingeniosos y legendarios. Sabía que una vela encendida dentro de un frasco cerrado se apagaba en pocos segundos. Hizo el experimento, y sin permitir el intercambio de aire entre el frasco y la atmósfera, colocó junto a la vela una planta por algunos días. Luego, utilizando una lupa para concentrar los rayos del sol sobre la vela, la encendió. ¡La planta había restaurado el aire y la vela ardía nuevamente!

Hoy sabemos que la razón por la que la vela se apaga es la misma por la que los animales mueren en el frasco sellado. Tanto la vela como un organismo vivo utilizan oxígeno para liberar energía a través de un proceso que llamamos combustión. Uno de los productos finales de ésta es el anhídrido carbónico, cuya toxicidad aumenta significativamente con la concentración. En la medida en que el

oxígeno es reemplazado por este gas en el frasco sellado, la vela se apaga y el ratón muere. Priestley estaba a punto de dar el primer paso para la comprensión de uno de los procesos fundamentales para la vida en la Tierra: la fotosíntesis. En ésta, las plantas son capaces de invertir el proceso de combustión, capturando el anhídrido carbónico y liberando oxígeno. El rol fundamental que cumple la luz solar en este fenómeno sería descubierto pocos años después por un médico nacido en Breda, la ciudad inmortalizada en un lienzo por Diego de Velázquez, de nombre Jan Ingenhusz. La energía del sol capturada por la clorofila de las hojas produce, entre otras cosas, el oxígeno que respiramos.

El oxígeno

Pero el instante clave, la cita definitiva de Joseph Priestley con la historia, llegó el lunes 1 de agosto de 1774. Lo que ocurría dentro de los frascos sellados no podía ser una propiedad exclusiva de las plantas. Si realmente estas producían un gas hasta entonces desconocido, necesario para la vida y para el arder de las velas, entonces debía haber alguna otra forma de obtenerlo. Priestley se dio cuenta de que al calentar óxido de mercurio cerca de una vela, ésta ardía con más vigor, una observación clave para lo que vino después.

En una sucesión de experimentos, cuya simplicidad e ingenio los convirtieron de inmediato en clásicos, Priestley mostró que podía hacer arder

una vela en un frasco sellado por mucho tiempo, si al lado colocaba una muestra de óxido de mercurio, calentada concentrando la luz solar con una lupa. Lo mismo hizo con ratones, mostrando que podía mantenerlos vivos por mucho tiempo utilizando esta técnica. Incluso probó inhalándolo él mismo. «La sensación en mis pulmones no era muy distinta que al respirar aire común, pero me pareció que mi pecho se sentía peculiarmente liviano y cómodo por un tiempo. Quién sabe si quizás con el tiempo, este aire purificado se pueda convertir en un elegante artículo de lujo. Por ahora, sólo dos ratones y yo hemos tenido el privilegio de respirarlo».

Priestley llamó al nuevo gas *aire desflogisticado*. Esto se debe a que él se adhería a la teoría del *flogisto*, un supuesto fluido que los objetos liberaban durante la combustión. El *aire desflogisticado* tenía, por lo tanto, la capacidad de absorber mucho más eficientemente el flogisto, lo que para Priestley explicaba por qué en su presencia los objetos experimentaban una combustión más vigorosa. Fue el francés Antoine Lavoisier, al que Priestley describió en persona sus experimentos, quien los interpretó correctamente y le dio el nombre de *oxígeno* a esta nueva sustancia, desechando la teoría del flogisto. El oxígeno era uno de los componentes del aire de nuestra atmósfera y, por sí mismo, el responsable del fenómeno de la combustión. La obstinada defensa de la teoría del flogisto le significó a Priestley un creciente aislamiento científico en la revolucionaria era que inauguró Lavoisier en el campo de la química.

Piensas en esto cuando vuelves a la que será tu nueva oficina, contemplando la multitud de cajas que habrás de desempacar. Y te avergüenzas de envidiar el poco equipaje con el que Priestley partió a América, el 8 de abril de 1794, amenazado por la intolerancia que despertaba su espíritu disidente, su libertad de pensamiento y sus simpatías por la Revolución Francesa. Al que no envidias es a Lavoisier, quien exactamente un mes más tarde, perdió la cabeza por ella.

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestra gratitud a Patricio De La Paz, Francisco Aravena, Enrique Mujica y José Luis Santa María, de la revista *Qué Pasa*, quienes apostaron por nosotros y contribuyeron significativamente a nuestro crecimiento como comunicadores científicos. Mucho es lo que debemos a los tres Jorges, Mira, Wagensberg y Zanelli, por su inspiración y confianza. A Irene Dubrovsky por regalarnos su arte, evocador de geografías imaginarias.

Al apoyo incondicional y constante de Mariela y Silvina pese a las horas robadas para completar este libro, a la incombustible ilusión que devuelven las miradas de Juan, Nadia, Alex y Martina, y al entrañable e imperecedero respaldo de Norma, Franklin, Luis y Eva, están dedicadas estas páginas escritas con amor. *Sólo el amor convierte en milagro el barro*.

ÍNDICE ONOMÁSTICO

Airy, George 174
Allen, Woody 235
Ana de Gran Bretaña 174
Anderson, Carl 25
Anderson, Philip 93
Aristóteles 48
Arundel (Thomas Howard *Lord Arundel*) 217
Aubrey, John 216
Avila, Artur 177
Babbage, Charles 174
Bacon, Francis 216, 217, 221
Barrow, Isaac 170, 171, 175
Beatles, The 27
Becquerel, Antoine Henri 32
Begeman, Louis 78
Bentinck, John 210
Black, Joseph 243
Bohr, Harald 47
Bohr, Niels 25, 34, 35, 46, 47, 50, 51, 52, 53
Bolt, Usaín 41

Borges, Jorge Luis 80, 183
Born, Max 53
Brout, Robert 85, 91, 93, 94
Brown, Robert 49
Bruno, Giordano 170
Byrne, David 117
Carlos I de Inglaterra 170, 216
Carrelli, Antonio 104
Casimir, Hendrik 116
Chadwick, James 34
Clapton, Eric 159, 160, 161, 164, 165, 166
Cleve, Per Teodor 237
Conan Doyle, Arthur 32
Constanza, George 109, 117
Copérnico, Nicolás 170
Cowan, Clyde 37, 38
Cromwell, Oliver 171
Curie, Marie (Marie Sklodowska) 32, 33 97
Curie, Pierre 32, 33
Dalton, John 49
Darwin, Charles 14
Davy, Humphry 161
Debye, Peter 34
Demócrito 48, 208
Didí (Waldir Pereira) 230
Di Stéfano, Alfredo 230
Dios 131, 150, 187, 215, 236
Dirac, Paul 14, 15, 19, 20, 22 23, 24, 25, 26, 27, 53, 72, 76, 82, 83, 84, 103, 175, 177
Doppler, Christian 125

Dyson, Freeman 26, 219
Edelstein, José 8, 9, 11, 12, 15
Ehrenfest, Paul 35
Ehrenhaft, Felix 76, 84
Einstein, Albert 13, 14, 21, 22, 34, 38, 42, 43, 49, 52, 61, 62, 84, 122, 123, 126, 142, 198, 201
Englert, François 85, 91, 93, 94, 95
Escher, Maurits Cornelis 141, 142, 152
Euclides 171
Faraday, Michael 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166
Fedorov , Evgraf Stepanovich 153
Fermi, Enrico 37, 101, 102, 104
Feynman, Richard 15, 25, 26, 27, 62, 63, 72, 80, 81, 139, 140
Fletcher, Harvey 78, 79, 80
Franklin, Benjamin 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 242
Freud, Sigmund 140
Galilei , Galileo 102, 170, 171, 172
Gianone, Angelo 26
Gladstone, William 164
Glashow, Sheldon Lee 89, 90
Gomberoff, Andrés 8, 9, 11, 12, 15
Green, Michael 177
Guillermo I de Alemania 235
Guralnik, Gerald 93
Hagen, Carl Richard 93
Halley, Edmund 120, 173
Harrison, Jerry 117

Hawking, Stephen 15, 143, 144, 169, 176, 177, 179, 184, 185, 186, 187, 215
Heidegger, Martin 13
Heisenberg, Werner 19, 24, 53
Hertz, Heinrich 60, 61
Higgs, Peter 85, 91, 92, 93, 94, 95
Hilbert, David 198
Hill, Christopher 198
Hitler, Adolf 199
Holmes, Sherlock 31, 32, 35
Hooke, Robert 58
Hubble, Edwin 123, 125
Huygens, Christiaan 59
Ingenhusz, Jan 245
Janssen, Jules 235, 236, 237
Jesús de Nazareth 204
Jung, Carl 38
Kamerlingh Onnes, Heike 238
Kapitsa, Piotr 83, 84
Kelvin (William Thomson *Lord Kelvin*) 215
Kepler , Johannes 151, 155
Kibble. Thomas 93
Kouwenhoven, Leo 100
Krylova, Anna 84
Larmor, Joseph 174, 175
Lavoisier, Antoine 246, 247
Lecky, William 164
Lederman, Leon 198
Leibniz, Gottfried 13, 110, 173
Lemaître, Georges 122, 123

Lennon, John 27
Leucipo 47, 48, 208
Lighthill, James 175
Lockyer, Norman 236
Lorenz, Edward 189, 190
Lucas, Henry 169, 170, 174, 177
Lüders, Gerhart 131
Magnus, Heinrich Gustav 227, 229, 231
Majorana, Ettore 99, 102, 103, 104, 107
Maldacena, Juan 9
Maxwell, James Clerk 59, 82, 83, 87, 89
Meitner, Lise 34
Messi, Lionel 47
Michelson, Albert 215
Millikan, Robert 14, 69, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 82, 83, 84
Mira, Jorge 10
Mirzakhani, Maryam 177
Monroe, Marilyn 152
Montana, Tony 65
Morley, Edward 215
Mussolini, Benito 99
Neruda, Pablo 120, 210
Newton, Isaac 13, 15, 34, 39, 56, 57, 58, 59, 61, 62, 68, 102, 169, 172, 173, 174, 175, 177, 217, 224, 227, 231
Noether, Emmy 13, 14, 15, 193, 195, 197, 198, 199, 200, 201
Olbers, Heinrich 120
Oppenheimer, Robert 27, 142, 143

Ørsted, Hans Christian 162
Orton, Mark 239
Palmieri, Luigi 236
Parménides 48
Pauli, Wolfgang 23, 24, 34, 35, 36, 37, 38, 42, 102, 131
Pauling , Linus 157
Pelé (Edson Arantes do Nacimento) 230
Penrose, Lionel 140, 141
Penrose, Roger 15, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 154, 155, 156, 157, 158
Penzias, Arno 143
Perlmutter, Saul 119
Pernambucano, Juninho 230
Piazolla, Astor 97
Pink Floyd 53
Planck, Max 21, 52
Plinio el Viejo 203, 204, 205, 208, 209, 211, 217, 221
Plutarco, Mestrio 95
Poe, Edgar Allan 120, 121
Price, Richard 242
Priestley, Joseph 242, 243, 244, 245, 246, 247
Puskás, Ferenc 230
Reines, Frederick 37, 38
Relf, Keith 161
Riebau, George 160, 161
Riess, Adam 119
Robbins, Benjamin 227
Rodríguez, Silvio 119

Rojo, Alberto 221
Rutherford, Ernest 32, 45, 46, 49, 50, 237
Sagan, Carl 215
Sánchez, Leonel 223, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231
Saunderson, Nicolas 174
Schmidt, Brian 119
Schrödinger, Erwin 53, 175
Schwarzschild, Karl 142, 143
Schweppe, Johann Jacob 243
Seinfeld, Jerry 109, 117
Shakira (Shakira Mebarak) 92
Shechtman, Dan 147, 149, 150, 153, 154, 156, 157, 158
Snyder, Hartland 142
Sócrates 47
Stokes, George 174
Stokowski, Leopold 80
Thatcher, Margaret 172
Thomson, Joseph John 76, 77, 78
Valdano, Jorge 50
Velázquez, Diego de 245
Vespasiano, Tito Flavio 203
Virgilio, Publio 203
Voltaire (François-Marie Arouet) 172
Wagensberg, Jorge 9, 16
Waits, Tom 239
Waters. Muddy 161
Weinberg, Steven 93
Weyl, Hermann 24, 195, 196, 198, 200

Wheeler, John Archibald 80, 81, 144
Whiston, William 173, 175, 176
Wilczek, Frank 9
Wilson, Robert 143
Woodward, Vivian 47
Yashin, Lev Ivanovich 223, 227, 229, 230, 231, 232
Young, Thomas 68
Zenón de Elea 48
Zico (Artur Antunes Coimbra) 230
Zumino, Bruno 131, 136